# UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

## ÁREA DE INGENIERÍA MECÁNICA

# FABRICACIÓN INDUSTRIAL

**Grado en Ingeniería Electrónica Industrial (Plan 2010)**
**Grado en Ingeniería Mecánica (Plan 2010)**

# APUNTES DE TEORÍA

**Autor y edición:**
**Alejandro López Martínez**
**Almería, enero 2013**
**Actualizado, septiembre 2013**

# INDICE

**Tema 1. Introducción ..... 1**
1.1 Definiciones ..... 1
1.2 Manufactura ..... 5
1.3 Un poco de Historia ..... 6
1.4 Diseño del producto y la Ingeniería Concurrente ..... 22
1.5 Criterios para el diseño para la manufactura, ensamblaje y desensamblaje y servicio ..... 24
1.6 Criterios para la selección de materiales ..... 25
1.7 Criterios para la selección de los procesos. Clasificación de los procesos de fabricación ..... 26
1.8 Fabricación y Medio Ambiente ..... 32
1.9 Fabricación y los ordenadores ..... 32
1.10 Producción esbelta y manufactura ágil ..... 34
1.11 Tendencias generales de la manufactura ..... 35
1.12 Introducción a la Metrología y la Calidad ..... 36

**Tema 2. Sistemas de Fabricación ..... 38**
2.1 Introducción ..... 38
2.2 Sistemas de Transferencia ..... 39
2.3 Sistemas Flexibles de Fabricación ..... 40
2.4 Robots ..... 41
2.5 Control Numérico ..... 45
2.6 Sistemas de Control de Planta ..... 46
2.7 Fabricación Integrada por Ordenador ..... 47

**Tema 3. PROGRAMACIÓN DE MÁQUINAS-HERRAMIENTA MEDIANTE CÓDIGO NUMÉRICO ..... 50**
3.1 Introducción ..... 50
3.2 Fundamentos de Mecanizado ..... 50
3.3 Materiales para herramientas de corte y fluidos de corte ..... 64
3.4 Control Numérico ..... 67
3.5 El torno CNC ..... 74
3.6 La fresadora CNC ..... 117
3.7 Máquinas de Corte CNC (Oxicorte) ..... 124
3.8 Programación en tornos CNC con lenguaje avanzado ..... 133

**Tema 4. PROGRAMACIÓN DE MÁQUINAS-HERRAMIENTA MEDIANTE SIMULADORES Y PROGRAMAS CAD/CAM ..... 134**
4.1 Introducción ..... 134
4.2 Ingeniería y Diseño Asistido por Ordenador ..... 136
4.3 Fabricación Asistida por Ordenador (CAM) ..... 139
4.4 Programación de máquinas-herramienta mediante simuladores. WinUnisoft ..... 140
4.5 Programación de máquinas-herramienta mediante programas CAD-CAM. SolidWorks y SolidCAM ..... 152

**Tema 5. INTRODUCCIÓN AL MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD Y ALTA PRECISIÓN ..... 161**
5.1 Introducción ..... 161
5.2 Centros de Mecanizado ..... 164
5.3 Tipos de Centros de Mecanizado ..... 167
5.4 Características de los Centros de Mecanizado ..... 168
5.5 Máquinas de tipo Hexápodo ..... 169

**Tema 6. SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE ..... 171**
6.1 Introducción ..... 171
6.2 Automatización en Sistemas de Fabricación ..... 175
6.3 Sistema de Control en Sistemas de Fabricación Flexibles ..... 175
6.4 Sistema de Manipulación en Sistemas de Fabricación Flexibles ..... 176
6.5 Las máquinas en Sistemas de Fabricación Flexibles ..... 177

**Tema 7. SOLDADURA ..... 180**
7.1 Introducción ..... 180
7.2 Soldadura por Fusión ..... 183
7.2.1 Soldadura con oxígeno y combustibles gaseosos ..... 183
7.2.2 Soldadura por arco y electrodo no consumible ..... 185
7.2.3 Soldadura por arco y electrodo consumible ..... 187
7.2.4 Tipos de electrodos para soldadura por arco ..... 191
7.2.5 Soldadura por haz de electrones (EBW) ..... 192
7.2.6 Soldadura por rayo láser (LBW) ..... 192
7.2.7 Zonas en la unión soldada ..... 192
7.2.8 Diseños de la unión soldada ..... 193
7.3 Soldadura en Estado Sólido ..... 194
7.3.1 Soldadura en frío CW (laminación) ..... 194
7.3.2 Soldadura ultrasónica (USW) ..... 194
7.3.3 Soldadura por fricción (FRW) ..... 195
7.3.4 Soldadura por resistencia (RW) ..... 196
7.3.5 Soldadura por explosión (EXW) ..... 201
7.3.6 Unión por difusión (DFW) ..... 201
7.4 Soldadura Fuerte y Soldadura Blanda ..... 202
7.4.1 Soldadura Fuerte ..... 202
7.4.2 Soldadura Blanda ..... 205

**Tema 8. OTROS MÉTODOS DE FABRICACIÓN ..... 207**
8.1 Introducción ..... 207
8.2 Mecanizado Químico ..... 209
8.3 Mecanizado Electroquímico ..... 211
8.4 Rectificación Electroquímica ..... 213
8.5 Mecanizado por descarga eléctrica (electroerosionado) ..... 213
8.6 Mecanizado ultrasónico ..... 216
8.7 Mecanizado por rayo láser ..... 217
8.8 Mecanizado por haz de electrones ..... 218
8.9 Mecanizado por chorro de agua ..... 219
8.10 Mecanizado por chorro abrasivo ..... 220

**Tema 9. TECNOLOGÍAS DE SUPERFICIE. ACABADO SUPERFICIAL ..... 221**
9.1 Introducción ..... 221
9.2 Estructura e integridad superficial ..... 222
9.3 Textura y rugosidad superficial ..... 223
9.4 Fricción ..... 226
9.5 Desgaste ..... 227
9.6 Lubricación ..... 228
9.7 Tratamientos superficiales ..... 228
9.7.1 Tratamientos superficiales mecánicos ..... 229
9.7.2 Deposición y revestimiento mecánico ..... 229
9.7.3 Endurecimiento superficial y recubrimiento duro ..... 229

9.7.4 Rociado térmico ..... 229
9.7.5 Deposición de vapor ..... 231
9.7.6 Electrodeposición, deposición sin electricidad y electroformado ..... 232
9.7.7 Recubrimiento de conversión ..... 232
9.7.8 Inmersión en caliente ..... 233
9.7.9 Esmaltado de porcelana; recubrimientos cerámicos y orgánicos ..... 233
9.8 Limpieza de superficies ..... 233
9.9 Otros procesos de acabado superficial ..... 234

**BIBLIOGRAFÍA ..... 235**

# 1 TEMA 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Definiciones

A continuación se presentan algunas definiciones de términos presentes en la asignatura de Fabricación Industrial (www.rae.es):

**Ciencia:** Conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación y el razonamiento, sistemáticamente estructurados y de los que se deducen principios y leyes generales.

**Conformar**: Dar forma a algo.

**Innovación**: Creación o modificación de un producto, y su introducción en un mercado.

**Ingeniería**: Estudio y aplicación, por especialistas, de las diversas ramas de la tecnología.

**Fabricación**: Acción y efecto de fabricar.

**Fabricar**: Producir objetos en serie, generalmente por medios mecánicos.

**Fresadora**: Máquina provista de fresas que sirve para labrar metales.

**Manufactura**: Obra hecha a mano o con auxilio de máquina. En un sentido completo, es el proceso de convertir materias primas en productos.

**Máquina**: Artificio para aprovechar, dirigir o regular la acción de una fuerza. Conjunto de aparatos combinados para recibir cierta forma de energía y transformarla en otra más adecuada, o para producir un efecto determinado.

**Mecanizado**: Proceso de elaboración mecánica.

**Mecanizar**: Implantar el uso de las máquinas en operaciones militares, industriales, etc. Someter a elaboración mecánica. Dar la regularidad de una máquina a las acciones humanas.

**Moldear**: Hacer molduras en algo. Sacar el molde de una figura. Dar forma a una materia echándola en un molde.

**Oxicorte**: Técnica de cortar metales con soplete oxiacetilénico.

**Prototipo**: Ejemplar original o primer molde en que se fabrica una figura u otra cosa.

**Tecnología**: Conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico. Conjunto de los instrumentos y procedimientos industriales de un determinado sector o producto.

**Torno**: **1.** Máquina simple que consiste en un cilindro dispuesto para girar alrededor de su eje por la acción de palancas, cigüeñas o ruedas, y que ordinariamente actúa sobre la resistencia por medio de una cuerda que se va arrollando al cilindro. **2.** Armazón giratoria compuesta de varios tableros verticales que concurren en un eje, y de un suelo y un techo circulares, la cual se ajusta al hueco de una pared y sirve para pasar objetos de una parte a otra, sin que se vean las personas que los dan o reciben, como en las clausuras, en las casas de expósitos y en los comedores. **3.** Máquina que, por medio de una rueda, cigüeña, etc., hace que algo dé vueltas sobre sí mismo, como las que sirven para hilar, torcer seda, devanar, hacer obras de alfarería, etc. **4.** Máquina para labrar en redondo

piezas de madera, metal, hueso, etc. **5.** Instrumento eléctrico formado por una barra con una pieza giratoria en su extremo, usada por los dentistas para limpiar y limar la dentadura. **6.** Torniquete (II dispositivo para que las personas pasen de una en una). **7.** Freno de algunos carruajes, que se maneja con un manubrio. **8.** Vuelta alrededor, movimiento circular o rodeo. **9.** Recodo que forma el cauce de un río y en el cual adquiere por lo común mucha fuerza la corriente. **10.** Acción de pasar la adjudicación del remate, en los arrendamientos de rentas, al postor que ofrece mayores ventajas inmediatamente después de otro que lo tuvo primero y no dio dentro del término las fianzas estipuladas.

**Torno paralelo:** Aquel cuyo portaherramientas se mueve en sentido paralelo al eje de la pieza que se tornea, y que sirve para roscar.

**Torno revólver:** torno automático o semiautomático que dispone de un revólver para el cambio de herramientas.

Otras dos definiciones a tener en cuenta:

**Tecnología Mecánica:** Ciencia cuyo objeto es el conocimiento, aplicación y desarrollo de procesos óptimos para la conformación de conjuntos mecánicos, según especificaciones de diseño, basándose en el uso de factores productivos y teniendo en cuenta los fines del individuo, empresa y sociedad.

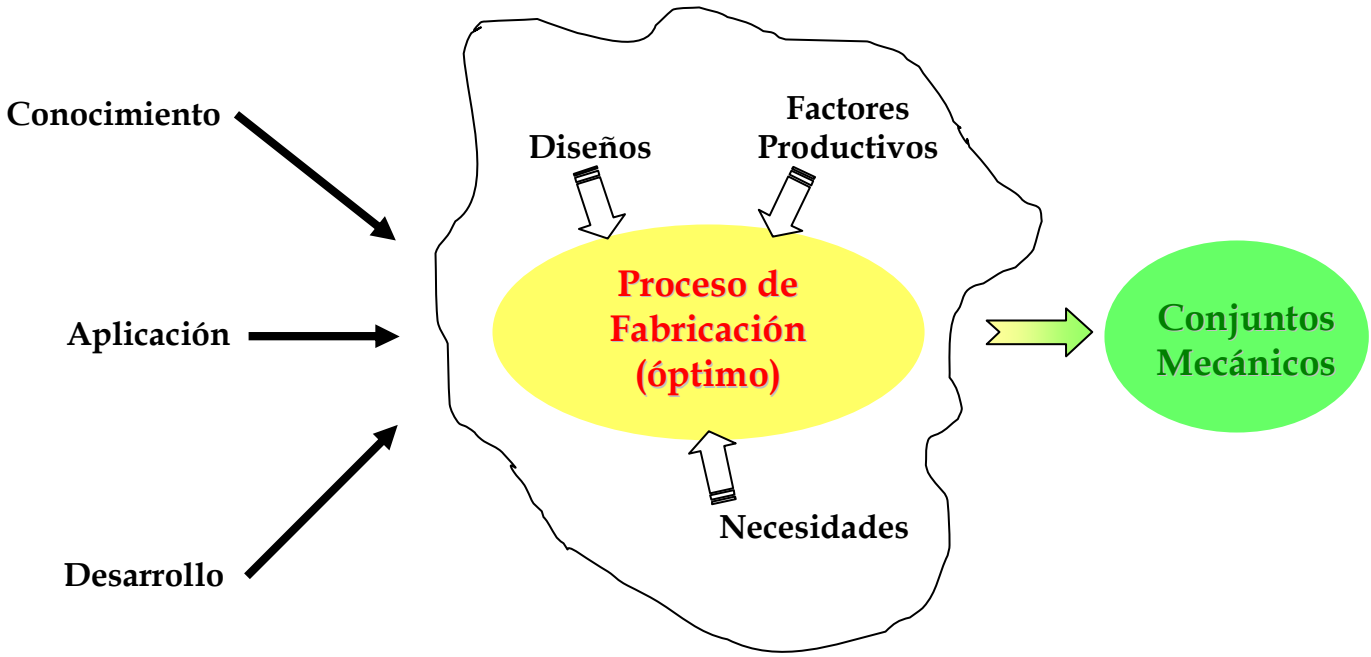



**Figura 1. Tecnología Mecánica.**

**Proceso de fabricación:** El objeto es obtener productos según especificaciones de diseño (planos e instrucciones) a partir de preformas o materias primas, con el apoyo de recursos de producción (materiales, equipos auxiliares, energía, información, personal…) realizado en un sistema de fabricación, mediante el empleo de una máquina o instalación con un método óptimo, de acuerdo a ciertas reglas conocidas y sometido simultáneamente a parámetros no dominados.

Un proceso de fabricación es aquel que, partiendo de unas materias primas, obtiene un producto diferente que satisface unas necesidades del propio fabricante o de su cliente. Existe una confluencia entre: el material (materia prima), la maquinaria y herramientas, la energía (necesaria) y la tecnología (cada vez más presente y más avanzada).

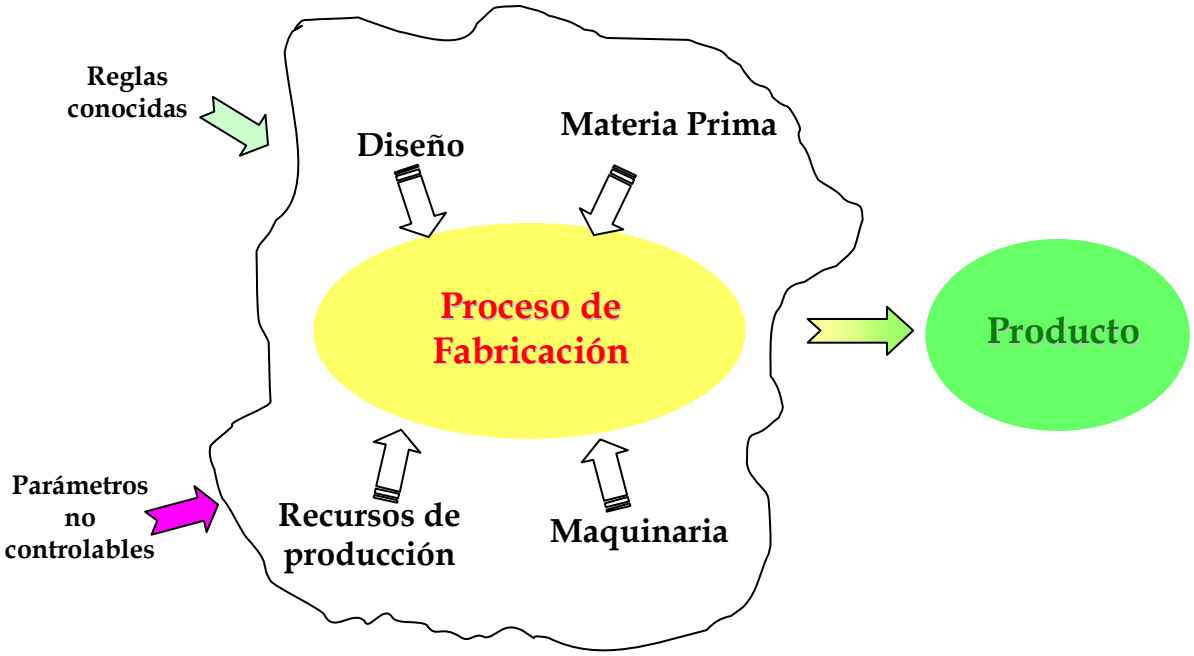



**Figura 2. Proceso de Fabricación.**

**Sistema (RAE): 1.** Conjunto de reglas o principios sobre una materia racionalmente enlazados entre sí. **2.** Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto.

**Productivo (RAE): 1.** Que tiene virtud de producir. **2.** Que es útil o provechoso. **3.** Que arroja un resultado favorable de valor entre precios y costes.

**Sistema Productivo:** conjunto de elementos (materiales, maquinaria, personal…) relacionados entre sí cuyo objetivo o finalidad es la obtención de algún producto o bien. Tendremos:

- Entradas → Materia prima, piezas elaboradas en otros procesos…
- Proceso/s → El propio proceso de fabricación.
- Salidas → Productos acabados, componentes de otros productos, prototipos… Los productos obtenidos pueden ser productos industriales (herramientas, motores…), bienes de consumo (alimentos, textiles…) o servicios.
- Entorno → Medio ambiente (residuos…), sociedad de consumo (clientes, mano de obra…), otros sistemas productivos (suministro de materia prima…), economía local y global, mercados locales, mercados internacionales, leyes, gobiernos, economía local, economía global... Relaciones bastantes complejas.

Un **sistema productivo** puede ser **discreto**:

- La variedad de productos es muy grande (flexibilidad).
- El producto se contabiliza por unidades.
- La automatización de los sistemas es compleja.
- Son sistemas que reaccionan rápidamente al cambio de tipo de producto (flexibilidad).
- Inversión más baja que en los continuos, a excepción de los que se desee automatizar.
- Necesidad de coordinación del gran número y variedad de materias primas.
- Los equipos utilizados son válidos para atender a distintas necesidades (máquinas universales y flexibles).

Un **sistema productivo** puede ser **continuo**:

- El producto obtenido es único, o si son varios, sus diferencias son muy pequeñas.
- Producción muy elevada. Se contabiliza en peso o volumen.
- Variables del sistema: temperatura, humedad, presión…
- Fábricas muy automatizadas.
- Sistemas rígidos al cambio de tipo de producto.
- Operan a plena capacidad (día y noche).
- El número de materias primas es bajo.
- Los equipos e instalaciones están muy especializadas para la fabricación de un producto concreto.

Un **sistema productivo** puede ser **combinado**:

- Continuos con características de discretos (más flexibles).
- Sistemas Justo a Tiempo (Just in Time).

***Lecturas recomendadas para este tema: Introducción general de la referencia bibliográfica [1]. Capítulo 2 de la referencia bibliográfica [2].**

## 1.2 Manufactura

Si observamos cualquier objeto de nuestro alrededor observamos que tanto el objeto como sus componentes (en el caso de que los tenga) tienen diferentes formas, que difícilmente se podrían encontrar en la naturaleza. Estos objetos se obtienen a partir de materias primas que son transformadas y ensambladas.

Podemos encontrar objetos formados por una sola pieza (un tornillo, un tenedor o la llanta de una bicicleta); objetos formados por varias piezas (unas tijeras, un lápiz o una silla); y son muchos los objetos que nos rodean que están formados por multitud de piezas (una impresora, una lavadora o un coche). Todos estos productos se fabrican por medio de diversos procesos denominados *manufactura*.

*Manufactura*: proceso de convertir materias primas en productos. Incluye también las actividades en el que un producto ya fabricado se utiliza para elaborar otros productos (Ejemplo: máquinas extrusoras que forman perfilería de aluminio).

La palabra *manufactura* deriva del latín *manu factus* ("hecho a mano") y se utilizó por primera vez en 1567. La palabra *manufacturar* apareció en 1683. La palabra *producto* significa "algo que se produce" y apareció, junto con el término *producción*, en el siglo XV. Los términos *manufactura* y *producción* suelen utilizarse de manera indistinta.

Los términos *fabricar* y *producir* hacen referencia a la realización de una serie de actividades cuyo objetivo es obtener un producto o bien determinado.

Podemos denominar *sistema productivo* al conjunto de elementos cuya interacción nos proporciona un determinado producto o bien. Dentro de cada sistema productivo tendrán lugar una serie de procesos (complejos o sencillos), que se pueden dividir en fases y operaciones.

A través de la *manufactura*, *proceso* o *sistema productivo* se transforman las materias primas en productos útiles. Estos productos manufacturados adquieren un **valor** añadido.

Dentro de la manufactura podemos diferenciar dos tipos básicos, aquellos procesos destinados a fabricar **productos discretos** (partes individuales: clavos, bolas para rodamientos, latas de conservas, bloques de motor…) o **productos continuos** (alambre, hojas de metal, tubos…) que luego se cortan en piezas individuales y se convierten en productos discretos.

La manufactura es una actividad bastante compleja, en ella interfieren gran variedad de recursos y actividades:

- Diseño del producto.
- Máquinas y herramientas.
- Planificación del proceso.
- Materiales.
- Compras.
- Manufactura propiamente dicha.
- Control de la producción.
- Servicios de soporte.
- Mercado.
- Ventas.
- Embarque.
- Servicios al cliente.

*Manufactura ≈ Fabricación*

Además, las actividades de manufactura deben responder a distintas demandas del mercado (clientes) y las tendencias de cada momento:

- Requisitos de **diseño, especificaciones y normas**.
- Seguir métodos **económicos** y respetuosos con el **medio ambiente**.
- **Calidad** del producto en todas sus etapas (desde el diseño hasta el ensamblado). Y no centrar los controles de calidad solo una vez obtenido el producto final.
- Los métodos de producción deben ser **flexibles** para poder adaptarse a las demandas del mercado en cualquier momento.
- Los continuos desarrollos de **materiales, métodos de producción e integración a las computadoras** deben evaluarse constantemente con el objetivo de que su implantación sea apropiada, oportuna y económica.
- Las actividades de manufactura deben considerarse como un **gran sistema**, cuyas partes se relacionan entre sí en diferente grado. Estos sistemas se pueden estudiar mediante la aplicación de modelos matemáticos que permitan analizar el efecto de cambios en uno varios de los factores que afecten al sistema (demandas de mercado, diseño del producto, métodos de producción, calidad…).
- Debe haber una relación entre el cliente final y el fabricante (retroalimentación) para conseguir una **mejora continua del producto**. Además de ofrecer al cliente final un buen **servicio de postventa** (mantenimiento, asesoramiento…).
- Búsqueda continua del máximo nivel de **productividad** (uso óptimo de los recursos: materia prima, mano de obra, maquinaria, energía, tecnología y capital). Se debe maximizar la producción por empleado y hora en todas las fases.

## 1.3 Un poco de Historia

El inicio de la manufactura data de los años 5000 a 4000 a.C. Aunque los orígenes de la manufactura posiblemente sean más antiguos que la historia registrada. La realización de los dibujos encontrados en cuevas y rocas primitivas requería del uso de algún tipo de pincel o brocha y de la "pintura" o "material" necesario para grabar en la roca. El hombre primitivo no disponía de ambos elementos tal cual en la naturaleza, por lo que necesitaba fabricarlos de algún modo.

En cuanto al uso de los diferentes materiales, se comenzó con la fabricación de productos en madera, cerámica, piedra y metal. Los materiales y procesos utilizados para dar forma a los productos (mediante fundición y martillado) se han ido desarrollando gradualmente con el paso de los siglos.

De oro, cobre y hierro eran los primeros materiales que se utilizaron para fabricar utensilios domésticos y ornamentales; seguidos de la plata, el plomo, estaño, latón y bronce. Entre los años 600 y 800 d.C. se introduce el acero; desde entonces se han desarrollado una gran multitud de diversos materiales ferrosos y no ferrosos. En la actualidad, los materiales empleados para tecnologías avanzadas incluyen materiales de ingeniería, desarrollados para fines concretos, con propiedades concretas y únicas: materiales cerámicos de última generación, plásticos reforzados, materiales compuestos, nanomateriales…

En cuanto a las tecnologías aplicadas en procesos de manufactura y fabricación, antes de la *Revolución Industrial* (que comenzó a mitad del siglo XVIII), los sistemas de fabricación dependían

principalmente de la mano de obra en todas sus fases. Con la revolución industrial llegó la mecanización de los procesos productivos; comenzando con el desarrollo de maquinaria para la industria textil y para el corte de metal. Este desarrollo iniciado en Inglaterra rápidamente se expandió por Europa y Estados Unidos. En 1800 se implantó el uso de *partes intercambiables* (creadas por Eli Whitney); antes de esta aportación era necesario el ajuste a mano de cualquier máquina, ya que no se podían fabricar dos piezas iguales. Actualmente, en la reparación de cualquier máquina se da por entendido que se puede cambiar cualquier elemento roto por otro nuevo de idénticas características. A día de hoy, son innumerables los avances y desarrollos de nuevas tecnologías que se han llevado a cabo.

A partir de la década de 1940 los avances tecnológicos se han desarrollado a gran velocidad, cabe destacar el desarrollo de las computadoras, desde sus comienzos hasta su estado actual. A día de hoy, los sistemas informáticos (control por ordenador, robótica, sensores) han permitido que los métodos de producción hayan avanzado mucho, permitiendo altas velocidades de producción, gran calidad en los procesos y productos, así como la gran facilidad de reproducir los procesos (reproductibilidad de productos).

**Tabla 1. Desarrollo histórico de materiales y procesos de manufactura.** **(Fuente [1])**

| Periodo | Años | Metales y fundición | Diversos materiales y composites | Formado y modelado | Unión | Herramientas, mecanizado y sistemas de manufactura |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Egipto: ~3100 aC - ~300 aC<br>Grecia: ~1100 aC - ~146 aC<br>Imperio romano: ~500 aC - ~476 dC<br>Edad Media: ~476 - ~1492<br>Renacimiento: siglo XIV - XVI** | < 4000 aC | Oro, cobre, hierro meteórico | Artículos de tierra, vidriería, fibras naturales | Martillo | -- | Herramientas de piedra, pedernal, madera, hueso, marfil, herramientas de composites |
| | 4000 – 3000 aC | Fundición de cobre, moldes de piedra y metales, proceso a la cera perdida, plata, plomo, estaño, bronce | | Estampado, joyería | Soldadura de cobre | Corindón (alúmina, esmeril) |
| | 3000 – 2000 aC | Fundición y estirado de bronce y oro | Perlas de vidrio, torno alfarero, recipientes de vidrio | Alambre (corte de hojas metálicas) | Remaches | Fabricación de azadones, hachas, herramientas para herrería y carpintería. |
| | 2000 – 1000 aC | Hierro maleable, bronce | | | | |
| | 1000 – 1 aC | Hierro fundido, acero fundido | Prensado y soplado de vidrio | Estampado de monedas | Soldadura por forja de hierro y acero, pegado | Cinceles, sierras, limas, tornos para madera |
| | 1 – 1000 | Zinc, acero | Vidrio veneciano | Armaduras, acuñado, forja, espadas de acero | | Grabado de armaduras |
| | 1000 – 1500 | Alto horno, diversos metales, fundición de campanas, peltre | Cristal | Estirado de alambre, orfebrería en oro y plata | | Papel lija, sierra impulsada por molino de viento |
| | 1500 – 1600 | Cañones de hierro fundido, placa de estaño | Vidrio plano fundido, vidrio de pedernal | Potencia hidráulica para trabajo de metales, laminación de tiras para monedas | | Torno de mano para madera |
| | 1600 – 1700 | Fundición en molde permanente, latón a partir de cobre y zinc metálico | Porcelana | Laminación (plomo, oro, plata). | | Mandrilado, torneado, mecanizado de roscas, taladro de columna |

**Tabla 1. Desarrollo histórico de materiales y procesos de manufactura (continuación).** **(Fuente [1])**

| Periodo | Años | Metales y fundición | Diversos materiales y composites | Formado y modelado | Unión | Herramientas, mecanizado y sistemas de manufactura |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Revolución Industrial: ~1750 – 1850<br>Primera Guerra Mundial<br>Segunda Guerra Mundial** | 1700 – 1800 | Hierro fundido maleable, acero de crisol (barras y varillas de hierro) | | Extrusión (tubos de plomo), embutición profunda, laminación | | |
| | 1800 – 1900 | Fundición centrífuga, proceso Bessemer, aluminio electrolítico, barras de níquel, metales babbitt, acero galvanizado, metalurgia de polvos, acero de hogar abierto | Vidrio para ventana de cilindro dividido, lámpara de luz, vulcanización, procesamiento del hule, poliéster, estireno, celuloide, extrusión de hule, moldeo | Martillo de vapor, laminación de acero, tubos sin costura, laminación de rieles de acero, laminación continuo, electrodeposición | | Cepillo de mesa fija, fresa, torno copiador, torno de torreta, fresado universal, disco vitrificado para rectificado |
| | 1900 – 1920 | | Fabricación automática de botellas, baquelita, vidrio de borosilicato | Doblado de tubos, extrusión en caliente | Oxiacetileno, soldadura de arco, resistencia eléctrica y térmica | Torno engranado, roscado automático, tallado de engranajes con fresa madre, herramientas de acero de alta velocidad, óxido de aluminio y carburo de silicio (sintético) |
| | 1920 – 1940 | Fundición a presión | Desarrollo de plásticos, fundición, moldeo, cloruro de polivinilo PVC, acetato de celulosa, polietileno, fibras de vidrio | Alambre de tungsteno a partir de polvo metálico | Electrodos recubiertos | Carburo de tungsteno, producción en masa, máquinas de transferencia |
| | 1940 – 1950 | Proceso a la cera perdida para piezas de ingeniería | Acrílicos, hule sintético, epóxidos, vidrio fotosensible | Extrusión (acero), estampado, metales en polvo para piezas de ingeniería | Soldadura de arco sumergido | Recubrimientos de conversión de fosfato, control de calidad total |
| | 1950 – 1960 | Molde cerámico, hierro dúctil, semiconductores, fundición continua | Acrilonitrilo butadieno estireno, fluorocarbonos, poliuretano, vidrio flotado, vidrio templado, cerámicos variados | Extrusión en frío (acero), formado explosivo, procesamiento termomecánico | Soldadura de arco de metal y gas, de tungsteno y gas y de electroescoria; soldadura por explosión | Mecanizado eléctrico y químico, control automático |

**Tabla 1. Desarrollo histórico de materiales y procesos de manufactura (continuación).** **(Fuente [1])**

| Periodo | Años | Metales y fundición | Diversos materiales y composites | Formado y modelado | Unión | Herramientas, mecanizado y sistemas de manufactura |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Era espacial Era de la información** | 1960 – 1970 | Fundición por compresión, álabes para turbinas de monocristales | Acetales, policarbonato, formado en frío de plásticos, plásticos reforzados, devanado de filamentos | Hidroformado, extrusión hidrostática, electroformado | Soldadura de arco de plasma y de haz de electrones, adhesivos | Carburo de titanio, diamante sintético, control numérico (CN), microcircuito integrado |
| | 1970 – 1990 | Grafito compactado, fundición al vacío, arena aglutinada orgánicamente, automatización del moldeo y colado, solidificación rápida, composites de matriz metálica, trabajo de metales semisólidos, metales amorfos, aleaciones con memoria de forma (materiales inteligentes), simulación por ordenador | Adhesivos, materiales composites, semiconductores, fibras ópticas, cerámicos estructurales, composites de cerámicos estructurales, plásticos biodegradables, polímeros conductores de la electricidad | Forjado de precisión, forjado isotérmico, formado superplástico, matrices fabricadas con diseño y fabricación asistida por ordenador (CAD/CAM), forjado y formado de forma neta, simulación por ordenador | Rayo láser, unión por difusión, soldadura blanda | Nitruro de boro cúbico, recubrimiento de herramientas, torneado de diamante, mecanizado de ultraprecisión, fabricación asistida por ordenador, robots industriales, centros de mecanizado, fabricación flexible, tecnología de detectores (sensores), inspección automatizada, sistemas expertos, simulación por ordenador |
| | 1990 – 2000 | Refundición, diseño de moldes y matrices asistido por ordenador, montaje rápido de herramientas | Nanomateriales, espumas metálicas, recubrimientos avanzados, superconductores de alta temperatura, cerámicos mecanizables, carbono como diamante | Prototipado rápido, montaje rápido de herramientas, fluidos respetuoso con el medio ambiente | Soldadura por fricción, soldadura a tope con láser, adhesivos conductores de la electricidad | Micro y nanofabricación, litografía, LIGA (litografía, electrodeposición y moldeo), mecanizado en seco, transmisiones de motores lineales, redes neuronales artificiales, seis sigma |

**Algunos conceptos a destacar de la Tabla 1:**

- **Pedernal:** variedad de cuarzo, que se compone de sílice con muy pequeñas cantidades de agua y alúmina. Es compacto, de fractura concoidea, translúcido en los bordes, lustroso como la cera y por lo general de color gris amarillento más o menos oscuro. Da chispas herido por el eslabón.
- **Corindón:** Piedra preciosa, la más dura después del diamante. Es alúmina cristalizada, y hay variedades de diversos colores y formas.
- **Azadones:** Instrumento que se distingue de la azada en que la pala, cuadrangular, es algo curva y más larga que ancha. Sirve para rozar y romper tierras duras, cortar raíces delgadas y otros usos análogos.
- **Vidrio:** Sólido duro, frágil y transparente o translúcido, sin estructura cristalina, obtenido por la fusión de arena silícea con potasa, que es moldeable a altas temperaturas.
- **Acuñar:** Imprimir y sellar una pieza de metal, especialmente una moneda o una medalla, por medio de cuño o troquel.
- **Peltre:** Aleación de cinc, plomo y estaño.
- **Cristal: 1.** Sólido cuyos átomos y moléculas están regular y repetidamente distribuidos en el espacio. **2.** Vidrio, especialmente el de alta calidad.
- **Vidrio o Cristal:** principal diferencia que el cristal contiene óxido de plomo (que no se puede fundir en el mismo horno junto con vidrio, la temperatura de fusión es diferente).
- **Orfebrería:** Arte del orfebre.
- **Orfebre:** Persona que labra objetos artísticos de oro, plata y otros metales preciosos, o aleaciones de ellos.
- **Vidrio de pedernal:** o vidrio de plomo, contiene potasio y plomo.
- **Acero de crisol:** acero elaborado mediante diferentes técnicas, basadas en el calentamiento lento y enfriado de hierro puro en un crisol (en presencia de carbono).
- **Crisol: 1.** Recipiente hecho de material refractario, que se emplea para fundir alguna materia a temperatura muy elevada. **2.** Cavidad que en la parte inferior de los hornos sirve para recibir el metal fundido.
- **Proceso Bessemer:** primer proceso de fabricación químico que sirvió para la fabricación en serie de acero, fundido en lingotes, de buena calidad y con poco coste a partir del arrabio.
- **Arrabio:** Fundición de hierro que se obtiene en el alto horno y que constituye la materia prima de la industria del hierro y del acero
- **Aluminio electrolítico:** obtención de aluminio mediante electrolisis.
- **Electrolisis:** Descomposición de una sustancia en disolución mediante la corriente eléctrica.
- **Metales babbitt:** o metales de cojinete, aleación que se utiliza para la superficie de apoyo en cojinetes de fricción (actualmente existen muchos tipos de aleación).
- **Acero galvanizado:** El galvanizado es el proceso electroquímico por el cual se puede cubrir un metal con otro (por ejemplo acero+zinc).
- **Acero de hogar abierto:** fabricado en hornos de hogar abierto.
- **Vulcanización:** Acción y efecto de vulcanizar.

- **Vulcanizar:** Combinar azufre con goma elástica para que esta conserve su elasticidad en frío y en caliente.
- **Hule:** Caucho o goma elástica.
- **Baquelita:** Resina sintética que se obtiene calentando formaldehído y fenol en presencia de un catalizador. Tiene mucho uso en la industria, especialmente en la preparación de barnices y lacas y en la fabricación de objetos moldeados.
- **Acrílicos:** Dicho de una fibra o de un material plástico: Que se obtiene por polimerización del ácido acrílico o de sus derivados.
- **Polimerización:** Reacción química en la que dos o más moléculas se combinan para formar otra en la que se repiten unidades estructurales de las primitivas y su misma composición porcentual cuando estas son iguales.
- **Epóxidos:** En química orgánica un epóxido es un radical formado por un átomo de oxígeno unido a dos átomos de carbono, que a su vez están unidos entre sí mediante un solo enlace covalente.
- **Vidrio fotosensible:** responden a la acción de la luz.
- **Hierro dúctil:** El hierro dúctil se obtiene mediante la introducción controlada de magnesio en el hierro fundido, y bajas proporciones de azufre y fósforo.
- **Semiconductor:** Se dice de las sustancias aislantes, como el germanio y el silicio, que se transforman en conductores por la adición de determinadas impurezas. Se usan en la fabricación de transistores, chips y derivados. Elemento que se comporta como un conductor o como aislante dependiendo de diversos factores (campos eléctricos o magnéticos, la presión, la radiación o la temperatura ambiente).
- **Vidrio flotado:** plancha de vidrio fabricada haciendo flotar el vidrio fundido sobre una capa de estaño fundido.
- **Cerámica:** Arte de fabricar vasijas y otros objetos de barro, loza y porcelana.
- **Álabes para turbinas de monocristales:** superaleaciones monocristal (a base de níquel).
- **Aleación:** Producto homogéneo, de propiedades metálicas, compuesto de dos o más elementos, uno de los cuales, al menos, debe ser un metal.
- **Devanar:** Ir dando vueltas sucesivas a un hilo, alambre, cuerda, etc., alrededor de un eje, carrete, etc.
- **Hidroformado:** conformado de algún material mediante algún líquido a presión (agua o emulsiones de agua y aceite).
- **Composites:** Los composites o resinas compuestas son materiales sintéticos que están mezclados heterogéneamente.
- **Fibras ópticas:** Hilo o haz de hilos de material altamente transparente por el cual se transmite información a grandes distancias mediante señales luminosas.
- **Formado superplástico:** El conformado superplástico es un método de fabricación basado en el comportamiento extremadamente dúctil de ciertos materiales que permite obtener formas casi acabadas mediante su deformación plástica.
- **Trabajo de metales semisólidos:** Moldeo de metales en estado semisólido, producción de piezas de metales no-férreos (aluminio, cobre, magnesio), combinando las ventajas de la fundición y la forja.
- **Metales amorfos:** metal con su estructura atómica desordenada.

- **Aleaciones con memoria de forma (materiales inteligentes):** capaces de recuperar su forma después de una deformación significativa.
- **Sistemas expertos:** sistemas informáticos capaces de realizar tareas y resolver operaciones complejas igual que lo harían expertos en la materia, pero con una capacidad mucho mayor.
- **Nanomateriales:** materiales con propiedades morfológicas inferiores a un micrómetro a alguna dimensión.
- **Espumas metálicas:** o espuma de aluminio. Combinan las ventajas estructurales de la espuma con las propiedades de los metales.
- **Prototipado rápido:** tecnología que hace posible la obtención de prototipos en tiempos relativamente bajos.
- **LIGA (litografía, electrodeposición y moldeo):** proceso utilizado para la fabricación de microsistemas, desarrollado hacia fines de los años 1970 en Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK). La sigla "LIGA" proviene del alemán, representan las siguientes etapas:
    - Litografía de rayos X: el patrón en dos dimensiones de las microestructuras es duplicado por litografía de rayos X sobre una capa de polímero fotosensible.
    - Galvanización por electro-deposición: el metal es depositado sobre las microestructuras.
    - Conformado: tras la disolución del polímero sobrante, el bloque de metal resultante suele tener la función de herramienta de formación.
- **Mecanizado en seco:** sin uso de lubricante/refrigerante (sin fluido de corte).
- **Seis sigma:** metodología de mejora de procesos, como objetivo tiene reducir la variabilidad del proceso, hasta niveles máximos de 3.4 defectos por cada millón de posibilidades.

**¿¿Hacia donde vamos??**

**Gary Acres:** "Las fábricas tradicionales no desaparecerán de la noche a la mañana, pero se empezarán a ver aparecer una nueva generación de fábricas mejor adecuadas. Se trata de fábricas más pequeñas que producen un solo producto especializado"

**Torben Andersen:** "La fábrica del futuro no será el tipo de esas vastas naves de producción en masa. Un mayor número de proveedores, geográficamente alejados, enviarán los diferentes componentes de un producto a la unidad de montaje. Esta fábrica será más extensa, compuesta de células individuales autónomas"

La especialización de cada unidad mejorará la eficacia. La competitividad dependerá de la productividad y de la calidad de los intercambios entre distintas unidades. También se mejorará la relación proveedor-cliente → Producto-Servicio. Fuerte presencia de las Tecnologías de la información (TIC's) → Productos Inteligentes (capaces de aprender de su entorno). Otras metas: nuevos materiales, menos contaminación desde el diseño del producto (fabricar pensando en reciclar).

**IMPORTANCIA DEL POTENCIAL HUMANO**

## La Tecnología Moderna (de la revolución industrial hasta la actualidad)

**(recordatorio de tecnología de la fabricación de 1º)**

En el último tercio del siglo XVIII surgen dos corrientes muy importantes en el desarrollo y evolución de la sociedad, la del conocimiento y la de la experimentación, con personajes históricos de gran relevancia (L. Euler, J. LouisLagrange, B. Franklin, J. D'Alembert, A. Lavoisier, D. Bernoulli).

**La Revolución Industrial:** el primer invento a considerar, quizás el más importante, sea la máquina de vapor (James Watt). Desde 1780 la máquina de vapor se introduce en fábricas de hilo de algodón, posteriormente en la fundición de hierro. En años sucesivos se van incorporando inventos que hacen posible pasar de la fabricación artesanal a la concentración de la fabricación en lo que hoy día conocemos como fábricas.

Aumenta (o se inicia) la relación entre ciencia e industria, lo que hace que los avances científicos se transfieran rápidamente a la fabricación o producción industrial. Algunos hechos importantes (**siglo XIX**):

- Desarrollo de los medios de transporte (máquina de vapor, ferrocarril). La primera locomotora de Stephenson data en 1813. La primera línea de ferrocarril data en 1825.
- Mejora de la comunicación (telégrafos).
- Gras estima de la ingeniería por parte de la sociedad.
- En Europa, se modifican universidades, se le da mucha importancia a los centros o institutos de investigación.
- En Alemania, a finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX, se reestructuraron las universidades (libertad docente, vocación científica). Se le dio autonomía a los alumnos para estudiar (composición de su currículo). Se le dio autonomía a la institución para investigar (fuerte desarrollo). Como resultado → fuerte desarrollo.
- Nacimiento de los estudios de ingenieros: Alemania 1770 (Technische Universität Berlin); Francia 1794 (École Polytechnique); Inglaterra 1823 (Mechanic's Institute. Londres); España 1850 (Estudios de Ingeniero Industrial en Madrid, Barcelona, Sevilla y Vergara).
- En Estados Unidos, surgieron conflictos entre los que apoyaban la forma tradicional de docencia en universidades y el interés de la sociedad por tener conocimientos más prácticos. A principios del siglo XIX la carencia de ingenieros en los Estados Unidos era muy importante (a penas 2 ingeniero por estado). Las universidades tardaron en reaccionar, hasta 1861 no se fundó el Massachusetts Institute of Technology (MIT), en 1865 abría su Escuela Industrial. Con el tiempo se copió el modelo europeo y proliferaron los institutos de investigación.
- Comienzan los estudios sistemáticos sobre procesos industriales (conformado por deformación plástica y mecanizado)
- Progresivamente los pequeños talleres pasan a centros de producción en cadena (fábricas).
- Muy importante: intercambiabilidad de piezas y montaje.
- Gran interés de producir en masa objetos estándares (sobretodos cuando eran componentes de maquinaria) → ingeniería de precisión (sobretodo en acero).
- A partir de 1856, el proceso de Bessemer (producción a gran escala) y posteriormente el horno abierto de Siemens (obtención de lingotes), permitieron la obtención de acero a precios asequibles. El procedimiento Bessemer fue el primer proceso de fabricación que sirvió para la fabricación en serie de acero, fundido en lingotes, de buena calidad y con poco coste a partir del arrabio (material fundido que se obtiene en el alto horno mediante

reducción del mineral de hierro; se utiliza como materia prima en la obtención del acero en los hornos siderúrgicos).

**Figura 3. Horno de Bessemer.**

- Principios siglo XIX, Whitworth desarrolló un sistema capaz de medir con gran exactitud (metrotecnia) las dimensiones de cualquier pieza, lo que permitió desarrollar máquinas capaces de fabricar elementos idénticos (inicio de la producción en serie).
- Alessandro Volta consigue en 1800 producir corrientes eléctricas de forma continua.
- Desarrollo del electromagnetismo, lo que permitió grandes avances tecnológicos.
- Inducción electromagnética (Faraday).
- Corriente alterna (Gramme).
- Obtención de fuerza motriz de origen eléctrico (alternativa al vapor).
- Fuerte desarrollo de los telares, se pasa del diseño manual de los dibujos de las telas, al uso de tarjetas perforadas para la selección de los hilos de urdimbre que se levantaban (sólo podían levantarse los hilos donde había un agujero en la tarjeta). Por ejemplo, para tejer un retrato eran necesarias 24000 tarjetas. Este sistema aún se utiliza para tejer telas de lujo por la compañía japonesa Nishijin. Estas tarjetas se pueden considerar como las percusoras del Control Numérico.
- Primer telar automático y primer torno para mecanizar metales (Jacques Vaucanson, 1709-1782).
- Primer máquina textil que realizaba distintos tipos de tejidos con solo modificar el programa introducido por medio de tarjetas de latón perforadas (Joseph Marie Jacquard, 1801).

**Figura 4. Telar de Jacquard.**

- Primero intentos de diseñar y fabricar mecanismos que simulen los movimientos humanos.
- A mediados del siglo XIX: se construye la primera calculadora, capaz de realizar cuatro operaciones aritméticas. Memoria capaz de almacenar mil números de 50 cifras. La entrada de datos se hacía mediante fichas de papel perforadas.
- A mediados del siglo XIX: se fabrican los primeros dispositivos de cálculo digitales de tipo electromecánico construido con relés.
- Leonardo Torres Quevedo (1852-1936): calculador de raíces.

**El progreso tecnológico y la segunda revolución industrial:** el periodo comprendido entre 1870 y 1914 es considerado por muchos historiadores como la "Segunda Revolución Industrial", el *progreso tecnológico continuo* pasó a ser un elemento estructural en la economía mundial. Se producen un gran número de innovaciones que van transfiriéndose de un país a otro cada vez con mayor facilidad. A destacar:

- Capacidad de reproducir mecánicamente los textos escritos → difusión de conocimientos (Mejora de la imprenta: impresión en continuo, rotativas; máquina de escribir).
- Nuevas fuentes de energía (petróleo y electricidad). Pila de Volta, generadores de corriente continua, generadores de corriente alterna.
- Motor de combustión interna (Nikolaus Otto, 1868).
- Neumático (Dunlop, 1888).
- Tratado sobre electricidad y magnetismo (Maxwell, 1873).
- Primera locomotora eléctrica (Werner V. Siemens, 1879).
- El 29 de enero de 1886, Karl Benz solicitó la patente de un vehículo de tres ruedas, que hoy es reconocido oficialmente como el primer automóvil del mundo.

**Figura 5. Primer automóvil reconocido actualmente.**

- Emite señales de radio (Marconi, 1896).
- El teléfono (Bell, 1876).
- La lámpara incandescente (Edison).
- La radio y la televisión.
- Almacenamiento de información sonora (grabación y recuperación de la información) sobre cintas magnéticas. El telegráfono que graba sonidos por medios magnéticos.
- En el ámbito doméstico: la máquina de coser (Isaac Merrit Singer, 1854), la plancha eléctrica (1880), la lavadora (John Fisher, 1908).

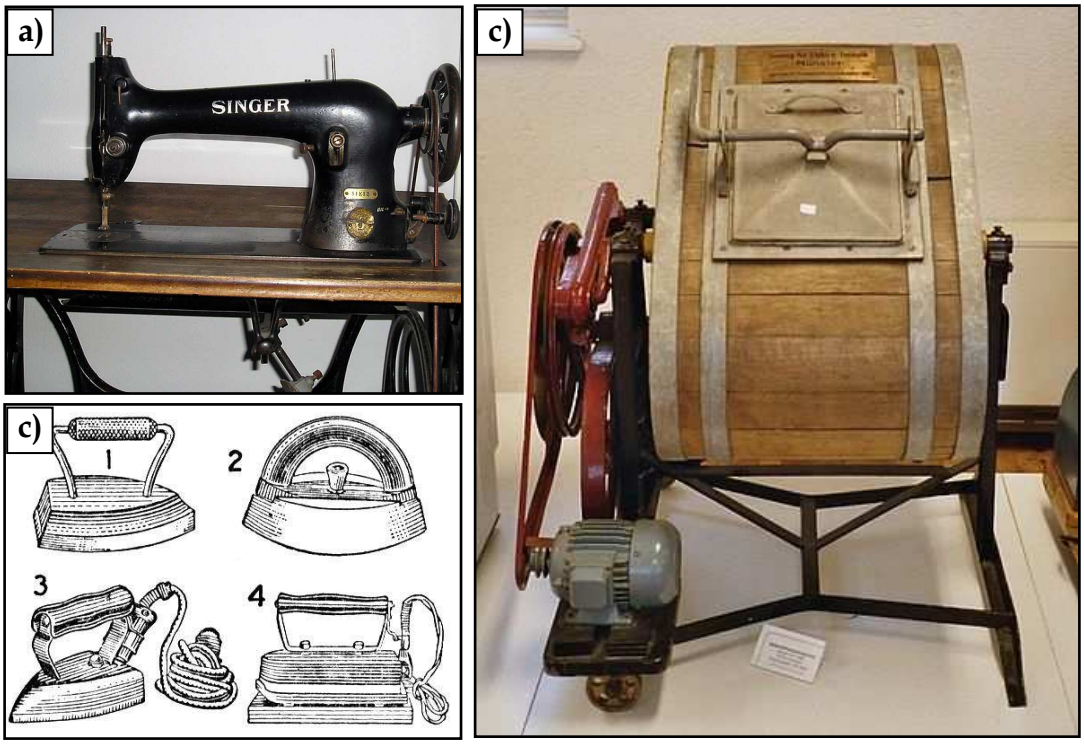



**Figura 6. Máquina de coser de Singer (a); Imágenes de las primeras planchas eléctricas patentadas (b); lavadora de fabricación alemana (c).**

- En 1882 Hadfield patenta su acero al manganesio → comienza la era del acero de aleación.
- Taylor introduce el cálculo de la duración herramientas de corte, vida útil (1903).
- Aplicación de nuevas aleaciones en herramientas de corte que soportaban mayores temperaturas de corte y permitían aumentar la velocidad de mecanizado. Aumenta la vida útil de las herramientas.
- Aparecen las herramientas de acero rápido.
- Desarrollo de nuevos materiales para herramientas: aleaciones fundidas (no férricas), carburos cementados.
- Aleaciones magnéticas (Kotaro Honda, 1916).
- Acero inoxidable (Elwoor Haynes, 1919).
- Con las nuevas herramientas se pasaba de tiempos de mecanizado de 100 minutos (a principios del siglo XX) a tiempos de 6 minutos en 1927 con los nuevos carburos cementados.
- Desarrollo de la industria química.
- Se produce un fuerte cambio en la organización de las empresas (grandes industrias): distribución de tareas y responsabilidades, planificación de la producción, protocolos y procedimientos escritos, control de la calidad (no solo del producto final, sino durante todo el proceso). Estudios sobre la planificación de la producción (optimización).
- Planificación y organización del trabajo (Grantt).
- Concepto de piezas intercambiables.
- Se demanda mayor presencia de la automatización de los procesos (sobretodo en industria automovilística).
- Primer coche fabricado en serie (Carl Benz, 1894).
- A principios del siglo XX se crea la primera planta de montaje donde se construían vehículos a partir de piezas estandarizadas fabricadas en otra factoría. El vehículo permanecía en un lugar fijo y los operarios iban y venían con los componentes (Ejemplo, fabricación del Ford T desde 1903). Con el coche fijo y los operarios moviéndose, excesivo gasto de tiempo.

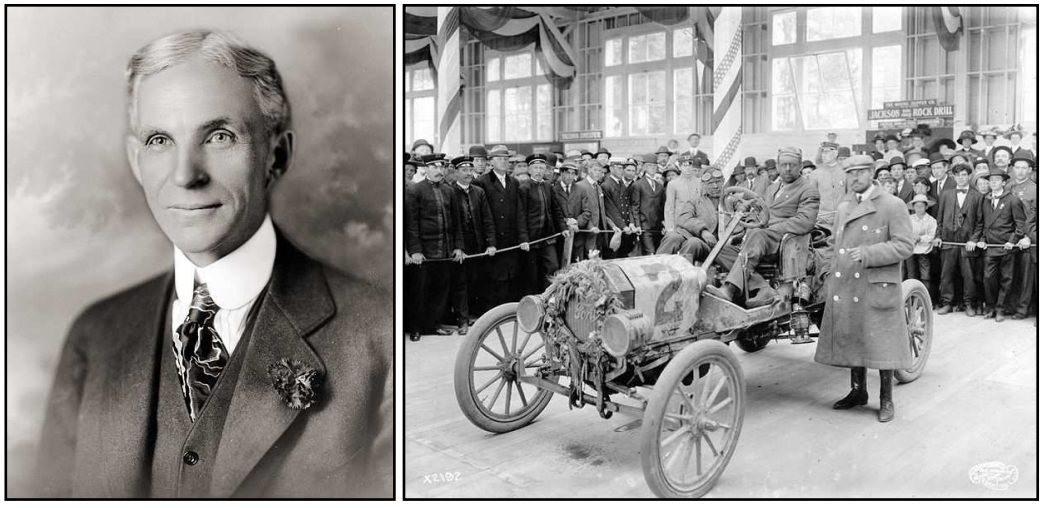


**Figura 7. Henry Ford (Izq.). Ford T (Dcha.).**

- Henry Ford (1913) prueba en su fábrica de Detroit un nuevo sistema: línea de fabricación de coches en cadena. El chasis del coche se monta sobre una cadena de eslabones que se mueve a lo largo de la nave industrial, son los operarios quienes permanecen fijos en sus estaciones de trabajo (cada estación de trabajo se encarga de una tarea diferente). Se ahorra en el tiempo de montaje un 85%.
- Se inicia la industria del plástico (PVC, 1912).

**Segundo tercio del siglo XX. El ordenador:** a mediados del siglo XX las empresas se replantean los métodos de fabricación y de producción:

- Importancia de la calidad. No sólo importa la calidad del producto final, se introducen términos como la calidad en el diseño (mejorar los diseños a partir de estudios de mercado y de los datos del servicio de post-venta).
- II Guerra Mundial impulsora del estudio de métodos y tiempo.
- Durante los años cincuenta se mejoran las máquinas de mecanizado, ganando en potencia y estabilidad. Desarrollo de nuevas herramientas para reducir el tiempo de mecanizado. Desarrollo de las plaquitas intercambiables para herramientas de mecanizado.
- Gran desarrollo de máquinas copiadoras para mecanizado. Utilización de plantillas y cintas perforadoras para el control de las máquinas.
- El control por leva en la automatización pasó al uso de sistemas hidráulicos y electrónicos. También se desarrollaron los finales de carrera.
- La industria aeroespacial (que requería de piezas complejas que sólo podían obtenerse por mecanizado) fue la verdadera impulsora del desarrollo de las máquinas-herramienta.
- La evolución de los ordenados permitió mecanizar una leva tridimensional para el regulador de la bomba de inyección de motores de aviación. La complejidad de esta leva hacía imposible su obtención mediante mecanizado convencional. Para obtener esta leva, se conecta una fresadora tridimensional de altas prestaciones con un potente calculador que envía la información codificada de la trayectoria de la herramienta. Este hecho es el precursor del Control Numérico Computerizado (CNC) de las máquinas-herramienta., así como de la robótica.
-

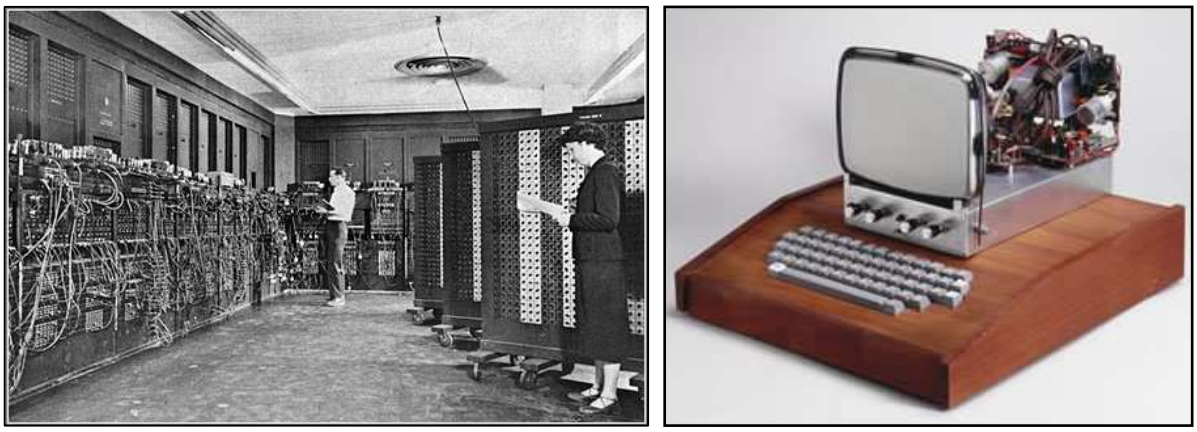


**Figura 8. Primer ordenador (Izq.); primer ordenador Apple (Dcha.)**

- Desarrollo ordenadores: permite los avances en control de calidad y automatización en procesos de fabricación.
- 1947 (John C. Parsons, Estados Unidos): control numérico de fresadoras mediante tarjetas perforadas.

**Figura 9. Cinta perforada para el control de máquinas-herramienta.**

- 1946 (G.C. Devol, Estados Unidos): control numérico con entrada de información almacenada por medios magnéticos.
- 1950 en el MIT: se desarrollan las primeras máquinas con Control Numérico gobernadas por ordenador.

**Figura 10. Torno CNC (Izq.); Fresadora CNC (Dcha.).**

- 1961 se publica el lenguaje APT (Adaptative Program Tooling) para programación de control numérico.
- Ingeniería asistida por ordenador.
- Desarrollo de sistema de manipulación y robótica. Los manipuladores eléctricos e hidráulicos → Robots.

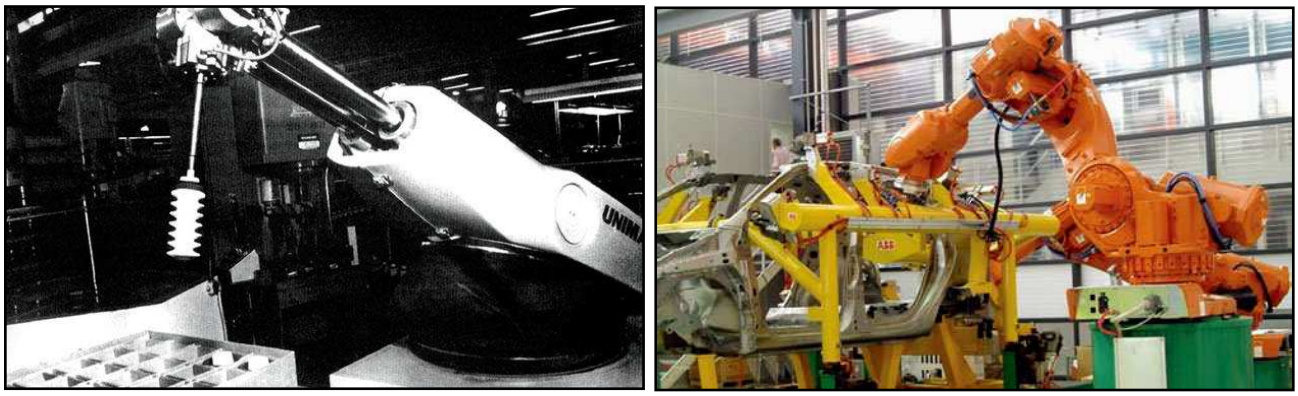


**Figura 11. Robot con accionamiento hidráulico (Izq.); Robot eléctrico (Dcha.).**

- Importante: Cambio Automático de herramientas (a finales de los años 50).
- Desarrollo de plaquitas intercambiables de metal duro recubiertas de carburo de titanio (1960-1970).
- Normas ISO para las plaquitas intercambiables (códigos de identificación).

**Último tercio del siglo XX.** Los años 70 fueron el comienzo de décadas en las que se produjeron grandes avances en la mejora de máquinas-herramienta, herramientas de corte, controles y métodos.

- Avances en tecnologías electrónicas e informática.
- Tecnología electrónica: permite obtener controles numéricos más potentes y fiables.
- Informática: programación de las máquinas (programación manual, programación asistida, programación gráfica interactiva…).
- Evolución: Control Numérico Computerizado (CNC) --- Sistemas Flexibles de Fabricación --- Fabricación Integrada por Computador.
- Diseño Asistido por Ordenador (CAD), Fabricación Asistida por Ordenador (CAM).
- Antes de 1974 los robots eran una mezcla de tecnología eléctrica, hidráulica y neumática. Aparecen los robots con accionamiento íntegramente eléctrico.
- Fuerte desarrollo de la robótica en todos sus campos.
- 1980: gran cantidad de software disponible, bajada de precios del hardware.
- Desarrollo de nuevos materiales para piezas, y nuevos materiales para herramientas que trabajen estos nuevos materiales para piezas.
- Ingeniería Concurrente: integración de los procesos de diseño con los procesos de fabricación.
- Métodos de control de la productividad. No sólo se busca el avance tecnológico, sino la mejor combinación posible entre hombre-máquina para conseguir la mayor productividad posible.

## 1.4 Diseño del producto y la Ingeniería Concurrente

El diseño de los productos se pude considerar como una de las fases más importantes, ya que en función de las decisiones tomadas durante la fase del diseño depende el 70-80% del coste total de desarrollo y fabricación del producto. El diseño de un producto requiere:

- Conocer sus funciones y finalidad.
- Conocer el mercado (potencial consumidor). Análisis de mercado y ventas.
- Saber si es nuevo o modificación de otro ya existente.
- **Conocer los procesos de fabricación posibles.**
- Flujo de información entre el departamento de ingeniería (**saber cómo se fabrica**) y el departamento de marketing (**saber qué queremos**).

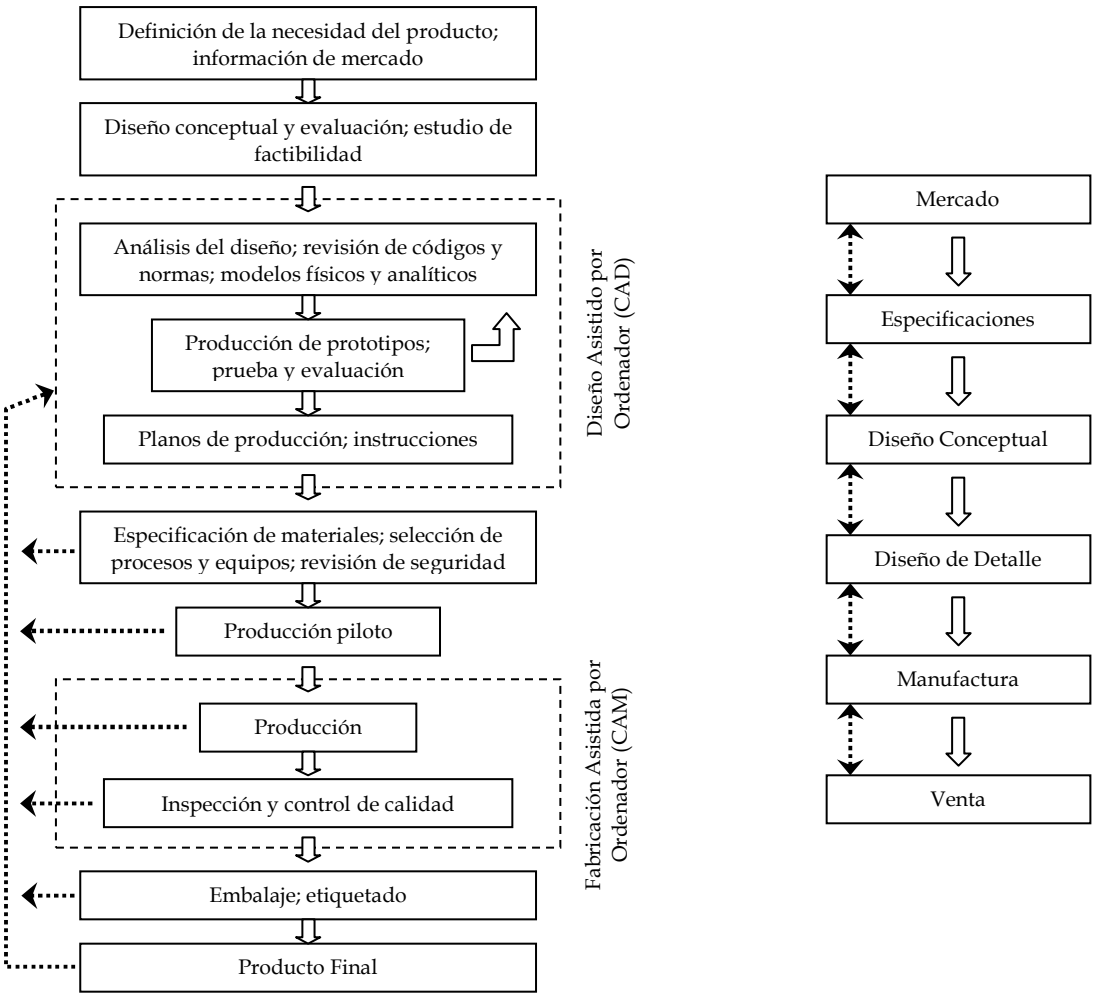



**Figura 12. (a) Fases comprendidas entre diseño y fabricación de un producto. (b) Flujo general de un producto en Ingeniería Concurrente. (Fuente [1]).**

**Ingeniería Concurrente**: en la actualidad los productos entran y salen de los mercados con mucha facilidad, la vida de un producto es cada vez más efímera. El mercado devora productos, siempre quiere productos nuevos, que mejoren los actuales. La Ingeniería **Concurrente** o **Simultánea** se basa en las interacciones recíprocas entre todos los departamentos responsables de un mismo producto. Todos los departamentos se involucran en las primeras fases de desarrollo de un producto, de este modo se reduce el número de errores, reduciendo la posible pérdida de tiempo. Es muy importante la *comunicación* entre diferentes disciplinas (ingeniería, mercado, servicio postventa, diseño, fabricación, diseño para el reciclaje, diseño para la seguridad).

El objetivo principal de la Ingeniería Concurrente, al integrar la fase de diseño y la fase de fabricación de un producto, es optimizar el **ciclo de vida** del producto, así reduce:

- Los cambios de diseño y la ingeniería del producto.
- El tiempo y coste entre el diseño y la fabricación (puesta en el mercado).

Un producto bien diseñado:

- Debe ser funcional (diseño).
- Tendrá un proceso de fabricación óptimo.
- Embalaje y empaquetado que asegure que el producto llega en perfecto estado al consumidor final.
- Funcionará correctamente para la finalidad que haya sido diseñado.
- Será fiable (cumplirá con su función el tiempo establecido), en caso de avería será tendrá una reparación sencilla (mantenimiento, servicio post-venta).
- Reciclable.

Ejemplo del beneficio de la Ingeniería Concurrente: una empresa redujo un 30% el número de componentes en uno de los motores que fabrica, con esto consiguió reducir un 25% el peso del motor y un 50% el tiempo de fabricación.

Importante: gracias al uso de técnicas como modelado y diseño asistido por ordenador (CAD), ingeniería asistida por computadora (CAE) y manufactura asistida por computadora (CAM), podemos analizar de forma rápida cualquier proceso de fabricación, diseñar de forma integra complejos sistemas o productos, simular situaciones reales para la ayuda en la toma de decisiones, fabricación de prototipos…

## 1.5 Criterios para el diseño para la manufactura, ensamblaje y desensamblaje y servicio

**Diseñar para fabricar o Diseño para manufactura (DFM)**: las personas responsables del diseño de un producto deben tener siempre en cuenta el modo en el que este producto se fabrica (materiales, procesos de fabricación, planificación de los procesos de fabricación, ensamblaje de componentes, controles de calidad). En la fase del diseño se deben tener en cuenta el tipo de máquina que se va a utilizar, las características y propiedades del material, la precisión dimensional, el acabado superficial…

**Diseñar para ensamblar y para desensamblar**: las operaciones de ensamblaje de los componentes de una pieza pueden suponer gran parte del coste de fabricación. En el diseño del producto se deberá tener esto en cuenta.

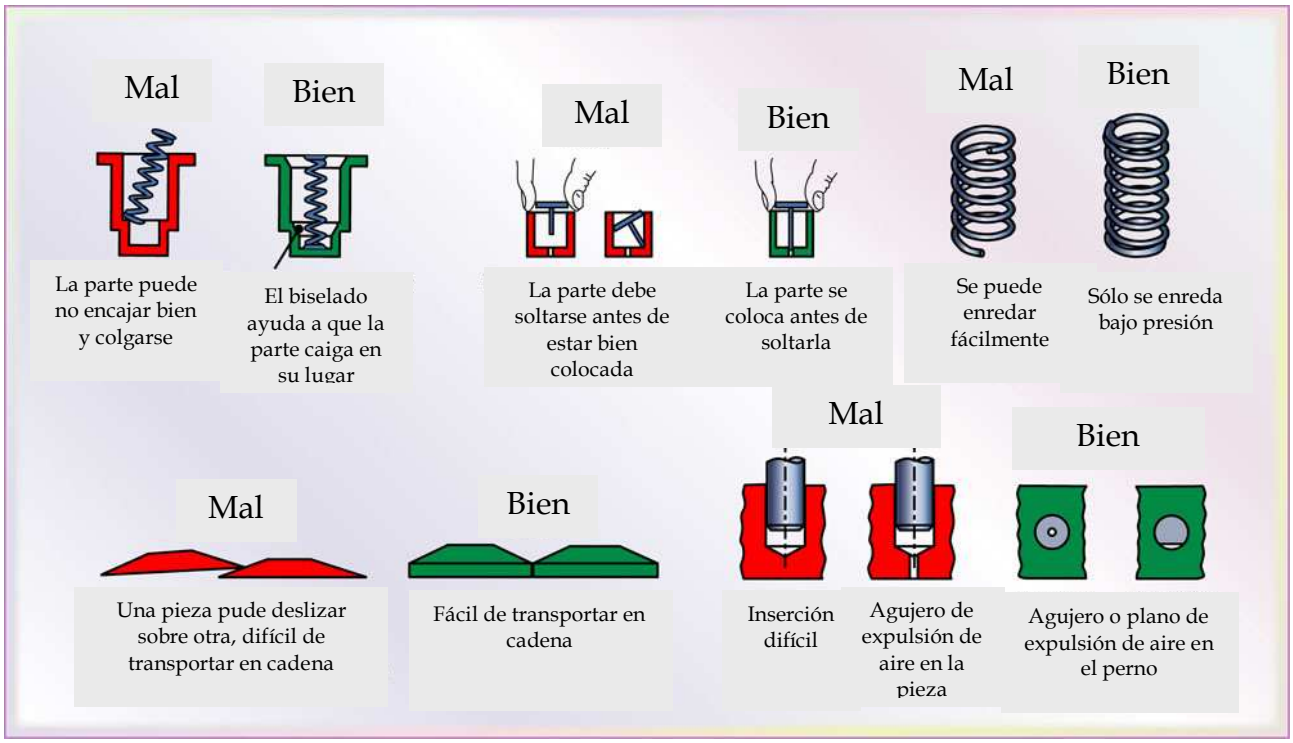



**Figura 13. Diseño para ensamble.** **(Fuente [1])**

Se deberá diferenciar si el proceso de montaje es manual o automatizado:

- Montaje manual: debe ser ergonómico (diseñado para ser montado por una persona); las piezas no deben ser ni muy pequeñas ni muy grandes, fáciles de agarrar, evitar que sean frágiles. Es preferible la simetría en las piezas, de modo que puedan ser montados en varias posiciones; si no hubiera simetría, el operario debe poder identificar fácilmente la posición correcta para el montaje. Además, debe haber buena iluminación, todos los componentes a ensamblar deberán ser accesibles, evitar grandes esfuerzos, evitar componentes complejos (normalización), sencillez de montaje, facilitar el autocentrado o autoacoplamiento, evitar el uso de tuercas (usar agujeros roscados).
- Montaje automatizado: se deberá prestar especial atención a la presentación de las piezas (el sistema automático de montaje deberá recibir las piezas en su posición correcta); tipo de acoplamiento (ajustes forzados, sujeción roscada, retenes, ajustes elásticos, soldadura y adhesivos, remachado, costura…); control de esfuerzos (debe haber algún sistema que los esfuerzos durante el montaje automático para evitar daños en los componentes y/o en el producto final).

## 1.6 Criterios para la selección de materiales

Principales materiales disponibles:

- Metales ferrosos: aceros al carbono, aleaciones, inoxidables...
- Metales no ferrosos: aluminio, magnesio, cobre, níquel, titanio, superaleaciones, metales refractarios, berilio, zirconio, aleaciones de bajo punto de fusión y metales preciosos.
- Plásticos (polímeros): termoplásticos, termoestables y elastómeros.
- Cerámicos, vidrios, cerámicos vidriados, grafito, diamante.
- Composites: plásticos reforzados, de matriz metálica, de matriz cerámica (materiales de ingeniería).
- Nanomateriales, aleaciones con memoria de forma, aleaciones amorfas, semiconductores, superconductores y otros materiales avanzados con propiedades únicas.

Propiedades a tener en cuenta a la hora de seleccionar un material:

- Mecánicas (resistencia, tenacidad…).
- Físicas (densidad, calor específico, conductividad eléctrica…).
- Químicas (oxidación, corrosión…).
- Propiedades de manufactura (determinan que tecnologías de fabricación son aplicables a cada material, si se puede fundir, mecanizar…).
- Coste.
- Disponibilidad.
- Aspecto.
- Vida útil.
- Reciclaje.

## 1.7 Criterios para la selección de los procesos. Clasificación de los procesos de fabricación

Para cada producto y/o componente suelen existir diferentes procesos de fabricación posibles. Existen diferentes criterios para clasificar los diferentes procesos de fabricación:

- Según el producto obtenido (sólido, líquido o gaseoso, etéreo). Esta clasificación es demasiado sencilla e implica algunas dudas, ¿dónde incluimos los productos pastosos?
- Según el campo del sector productivo:
    - **Procesos de Fabricación Mecánica:** se obtienen productos en los que no se altera, en principio, su composición química. Generalmente se obtienen productos sólidos.
    - **Procesos de Fabricación Química:** su objetivo principal es alterar la composición química del material que se trabaje. Generalmente se obtienen productos líquidos y gaseosos, aunque también sólidos.
    - **Procesos de Obtención de Sistemas de Información:** su objetivo es crear herramientas que sirven de enlace y control de otros tipos de procesos.

La frontera entre un tipo de proceso y otro no es definitiva, existen procesos de fabricación que se pueden considerar procesos mecánicos y químicos.

Los **Procesos de Fabricación Mecánica** pueden:

- Dar consistencia: se parte de materia prima en estado líquido, pastoso, granulado o gaseoso y se obtienen productos sólidos (Ej. La fundición).
- Conservar la consistencia: se transforma una materia conservando su masa, sin eliminar ni añadir nada (Ej. Conformado por deformación plástica).
- Disminuir la consistencia: se transforma una materia eliminando material (Ej. Mecanizado).
- Aumentar la consistencia: se transforma una materia añadiendo material (Ej. Galvanizado).

**Alternativas de clasificación** de los procesos de fabricación (ver Capitulo 1 - Fuente [2]):

- Producto final obtenido: se pueden obtener piezas/productos semiacabado, componentes, piezas/productos finales, productos industriales, prototipos o productos de consumo. ¿Dónde incluimos el reciclado?
- Material sobre el que se trabaja: metales (aceros y derivados, aluminio…), materiales plásticos (termoplásticos, termoestables…), madera (madera natural, papel, conglomerados…), materiales compuestos, vidrio (laminado, ornamental), cerámicas, porcelanas y textiles.
- Sector industrial al que se destina el producto obtenido (gremios artesanales): automóvil, aeronáutico, naval, ferroviario, electrónico, electrodomésticos, minería, mueble, forestal, juguetes, construcción, edificación y obras públicas, petroquímico, energético, alimentario, médico y farmacéutico.

- Características del proceso: moldear, conformar, separar, unir, recubrir, modificar las propiedades del material, modificar las propiedades del producto.
- Máquina y herramienta: prensas, fresadoras o centros de mecanizado, tornos o centros de torneado, hornos, máquinas taladradoras, cilindros de laminación, máquinas de tracción o torsión. Algunas herramientas son susceptibles de ser implementadas en varios tipos de máquinas o funcionar de manera autónoma: herramientas de roscado, herramientas de atornillado, herramientas de marcado, herramientas de palpado.
- Grado de calidad del producto obtenido: no es lo mismo fabricar una tubería para la bajante de aguas residuales de un edificio residencial, que una tubería para una bajante de aguas residuales de un centro de investigación con productos altamente contaminantes o que una tubería para el circuito primario de una central nuclear.
- Grado de innovación tecnológica del proceso: podemos diferenciar entre procesos convencionales y procesos no convencionales. En general nos referimos a procesos en los que trabajamos con nuevos materiales avanzados, que requieren nuevos procesos de fabricación, de conformado, alto requerimiento de calidad, personal cualificado, procesos altamente automatizados, complejidad de formas, reducción de desechos, nuevas herramientas… Aunque lo que hoy podemos denominar no convencional, mañana será convencional.
- Consideraciones ambientales: contaminan, no contaminan, uso eficaz de los recursos o no (materiales, energía…), reciclado, reutilización...
- Otras clasificaciones: según costes, según tipo de energía…

En nuestro caso vamos a establecer la siguiente clasificación:

- **Fundición**: moldes desechables o moldes permanentes.
- **Conformado por deformación plástica y moldeado**: laminación, forja, extrusión, estirado o trefilado, conformado de chapa, metalurgia de polvos y moldeo.
- **Maquinado o Mecanizado:** torneado, mandrilado, taladrado, fresado, cepillado, escariado y rectificado, mecanizado por ultrasonidos, mecanizado químico, eléctrico y electroquímico; mecanizado por rayos láser.
- **Unión**: soldadura (blanda y fuerte), unión por difusión, por adhesión y unión mecánica.
- **Acabado**: pulido, tratamientos superficiales, satinado, recubrimiento…
- **Nanofabricación**: la tecnología más avanzada, capaz de producir piezas con dimensiones en el nivel nano (una milmillonésima).

La selección de un proceso o método de fabricación en concreto dependerá de múltiples factores: tipo de industria, tipo de materiales, capacidad de la empresa de incorporar determinadas tecnologías…

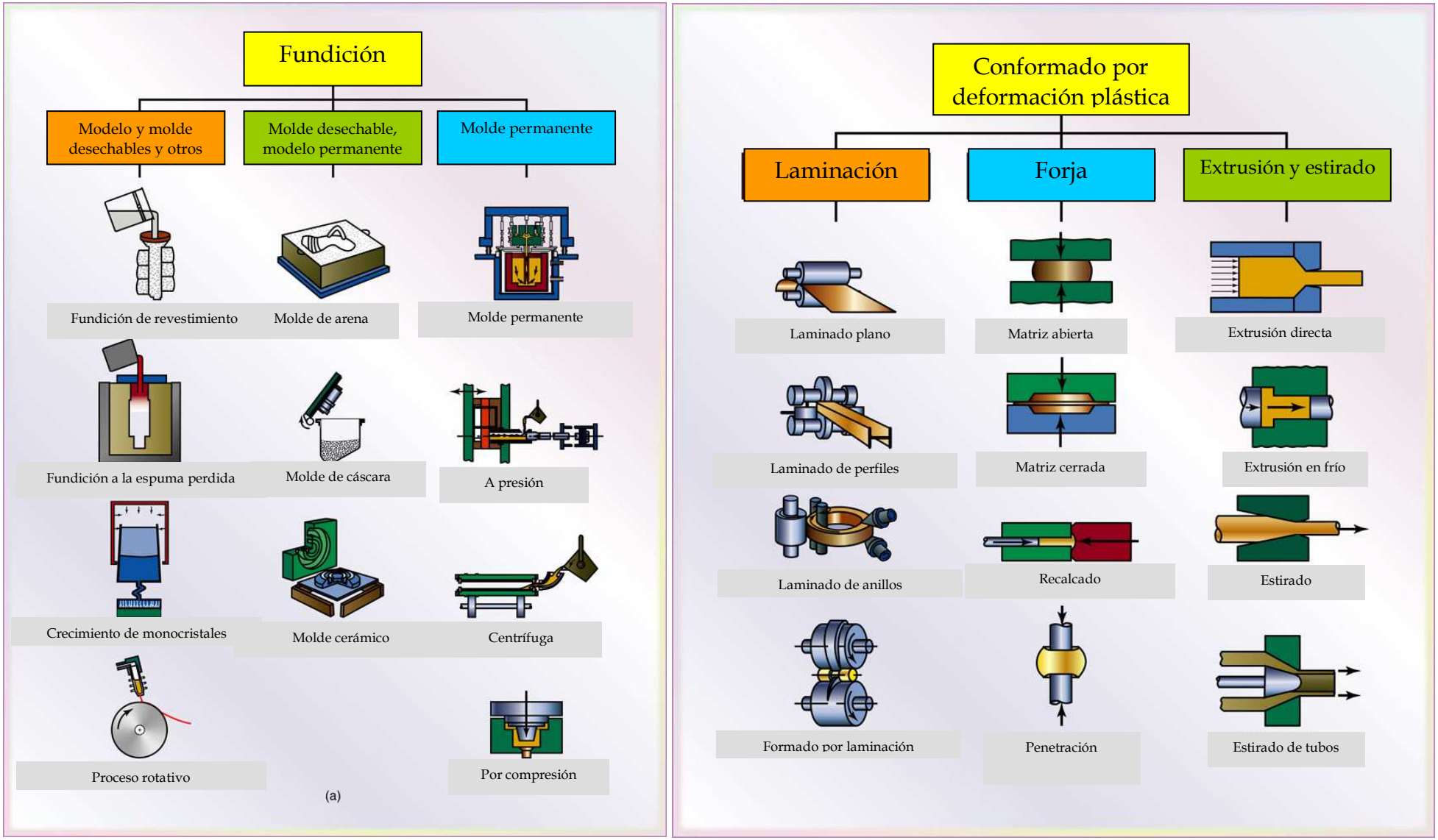



**Figura 14. Clasificación de los procesos de fabricación. (Fuente [1])**

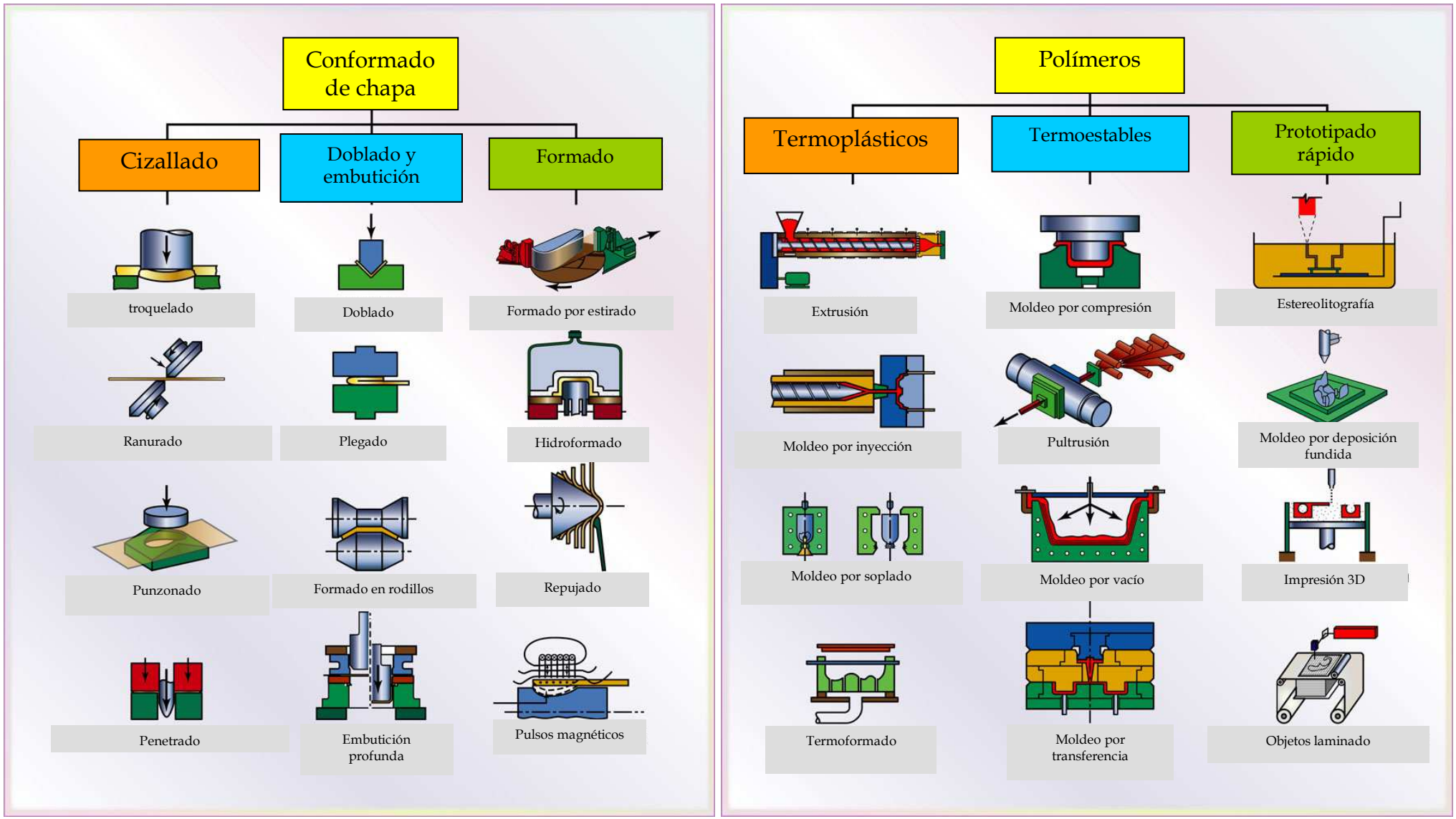



**Figura 14. Clasificación de los procesos de fabricación (continuación).** **(Fuente [1])**

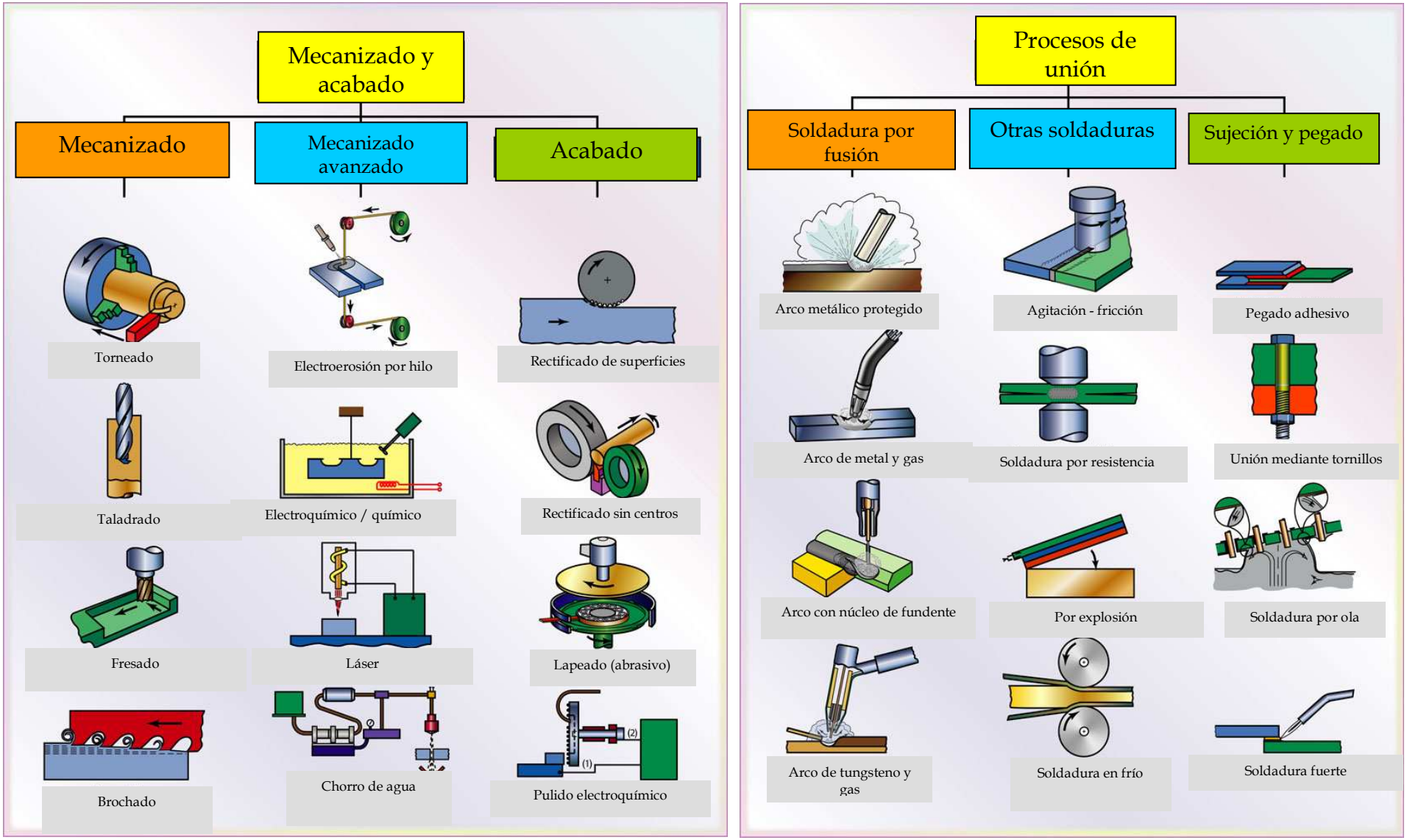



**Figura 14. Clasificación de los procesos de fabricación (continuación).** **(Fuente [1])**

Para cada producto y/o componente suelen existir diferentes procesos de fabricación posibles. Existen diferentes criterios para clasificar los diferentes procesos de fabricación. Algunos criterios a tener en cuenta para elegir un método de fabricación u otro:

- **Precisión dimensional y acabado superficial:** en función de la complejidad de la pieza a fabricar y de las dimensiones y tolerancias permitidas se deberá seleccionar un método u otro:
    - Piezas planas y delgadas son difíciles de obtener por fundición.
    - Piezas complejas son difíciles de obtener solo mediante conformado por deformación plástica.
    - En caliente suele obtenerse peor acabado superficial y peores tolerancias que en frío.
    - No todos los procesos de fundición presentan el mismo acabado superficial.
- **Coste:** el coste del utillaje y herramientas es otro aspecto fundamental a tener en cuenta (aspectos relacionados: tiempo de fabricación, vida útil de las herramientas y del utillaje). También hay que tener en cuenta el porcentaje de desperdicio de material en un proceso de fabricación (no es lo mismo realizar un conformado por deformación plástica que un mecanizado). Otros aspectos:
    - Disponibilidad de maquinaria.
    - Experiencia y capacidad del personal.
    - Número de componentes a fabricar.
    - Capacidad de producción (lotes pequeños o lotes grandes).
    - Coste medioambiental.

Y si no elegimos el material adecuado para un componente o el proceso de fabricación correcto:

- Puede dejar de funcionar nuestro producto (fallo de algún componente).
- El resultado conseguido no sea el esperado (no funciona todo lo bien que se desea, se desgasta fácilmente…).
- Vida útil baja, fallos de funcionamiento en poco tiempo: elevado coste de mantenimiento.

Concepto **Manufactura Neta**: este concepto hace referencia a que actualmente es difícil conseguir nuestro producto acabado con un único proceso de fabricación. Por ejemplo es difícil que mediante un proceso de conformado plástico consigamos el acabado final de nuestra pieza. Imagina que fabricamos una biela mediante fundición y moldeo, la pieza obtenida tendrá rebabas y las cotas finales posiblemente deberán ser obtenidas mediante mecanizado, al igual que el acabado superficial definitivo. El concepto de **Manufactura Neta** hace referencia a lo cerca que se fabrica una pieza o componente de su dimensiones finales deseadas, tolerancias, acabado superficial y especificaciones finales mediante la primera operación que se realice.

## 1.8 Fabricación y Medio Ambiente

La actividad industrial tiene efectos negativos sobre el medio ambiente, el ecosistema de la Tierra y, por tanto, en la calidad de vida del ser humano (contaminación del agua, del aire, reducción de la capa de ozono, lluvia ácida, efecto invernadero, residuos peligrosos). Se debe pensar siempre en minimizar el efecto negativo sobre el medio ambiente. Algunos criterios:

- Reducir el desperdicio de material (desde el diseño hasta la fabricación).
- Reducir el uso de materiales peligrosos.
- Invertir en I+D (Investigación y Desarrollo) para la obtención de nuevos materiales y procesos de fabricación respetuosos con el medio ambiente.
- Planificación e integración del reciclaje, tratamiento de residuos y reutilización de materiales desde el diseño del producto hasta el final de su ciclo de vida.

Concepto **Diseño y fabricación consciente del medio ambiente.**

Concepto **Diseño para el medio ambiente o Diseño verde:** este método intenta anticiparse al impacto negativo que la fabricación de un producto, su uso y desuso pueda tener el medio ambiente, definiendo y aplicando las medidas correctoras oportunas. Objetivos: evitar la contaminación, promover el reciclaje y la reutilización de los residuos (**Diseño para el reciclaje**).

## 1.9 Fabricación y los ordenadores

Aunque algunos de los procesos de trabajo mecánico se desarrollaron desde el año 4000 a.C., no fue hasta la Primera Revolución Industrial (década 1750) cuando se empezó a introducir la automatización en la fabricación. Algunos datos: las máquinas herramienta comenzaron a desarrollarse a finales del siglo XIX; las técnicas de producción en masa y los sistemas de transferencia en la década de 1920. Quizás, la innovación más importante sea el CN (Control Numérico) en máquinas herramienta (década 1950), a partir de ese momento el desarrollo ha sido vertiginoso, ligado al desarrollo de los ordenadores.

Con el desarrollo de los ordenadores (software y hardware) y su integración en los sistemas productivos y en la industria, se ha extendido la denominada **Manufactura o Fabricación Asistida por Ordenador (CAM)**, donde se integra el hardware y el software desde la concepción de un producto (su diseño) hasta su fabricación y distribución en el mercado, ventajas**.**

- Capacidad de respuesta a los cambios de demanda del mercado y del consumidor.
- Optimización en el uso de materiales, herramientas, utillaje y personal.
- Mayor control sobre la producción y la administración.
- Producción de alta calidad a bajo coste.

Algunas de las aplicaciones más importantes:

- **Control Numérico por Computador (CNC)**: sus inicios remontan a la década de 1950, se basa en el control del movimiento de máquinas-herramienta mediante la codificación de las órdenes en forma de códigos numéricos.
- **Control Adaptable (AC)**: los parámetros que regulan un proceso de fabricación se regulan y ajustan de forma automática para optimizar la velocidad de producción y la calidad del producto, minimizando su coste. En el control se integran sensores que monitorizan diferentes variables (fuerza, temperatura, acabado superficial, dimensiones de las piezas…) en función de las cuales se regulan los parámetros del proceso.

- **Robótica Industrial**: sus inicios se remontan a la década de 1960, sustituyen la mano de obra humana en tareas peligrosas y/o repetitivas, reduciendo los errores humanos, la variabilidad en la calidad de producción y aumentando la jornada de trabajo, aumentando la productividad.
- **Manejo automatizado de materiales**: manejo eficiente de materiales y componentes: transporte de materiales de un puesto de trabajo a otro…
- **Sistemas de ensamblaje automatizado o robotizado**.
- **Planificación de procesos asistida por ordenador**: se optimiza la productividad de un proceso mediante la planificación de todo el proceso, reduciendo costes.
- **Tecnología de grupos**: se agrupa la fabricación de piezas o componentes similares en familias o grupos (por similitud en su modo de fabricación). Se estandarizan los diseños y la planificación de la producción.
- **Sistema de fabricación Justo a Tiempo (Just in Time)**: la materia prima, los componentes y partes de un producto se suministran en cada fase productiva justo en el momento en el que hacen falta. Los componentes y partes se fabrican justo en el momento que hace falta. Los componentes y piezas se fabrican justo en el momento que los necesita el cliente. Se elimina o reduce al mínimo el almacenaje de productos. La calidad del producto se verifica en cada puesto de trabajo, cada puesto es responsable de la calidad en ese momento (la calidad no se verifica solo al final del proceso). Este sistema tiene su origen en Japón, donde la disponibilidad de suelo industrial es reducida. Método Sakichi Toyoda:
    - Just In Time (ジャストインタイム) Justo a Tiempo.
    - Kanban (看板, también かんばん) Tarjeta, o ficha.
    - Muda (無駄, también ムダ) Despilfarro.
    - Heijunka (平準化) Nivelado de la producción
    - Andon (アンドン) Pizarra.
    - Poka-yoke (ポカヨケ) evitar (yokeru) errores inadvertidos (poka).
    - Jidoka (自働化) No dejar pasar el error.
    - Kaizen (改善) Mejora Continua.
- **Manufactura o Fabricación Celular**: se utilizan estaciones de trabajo o "*Celdas de Fabricación*" (con varias máquinas-herramienta) controladas por un control central. Cada máquina realiza una operación diferente.
- **Sistemas de Fabricación Flexible**: integran *Celdas de Fabricación* en un sistema superior, todos ellos gestionados o controlados por un control central. Son sistemas costosos, pero que son muy flexibles a la hora de cambiar el tipo de producto producido.
- **Sistemas Expertos**: sistemas informáticos capaces de realizar tareas y resolver operaciones complejas igual que lo harían expertos en la materia, pero con una capacidad mucho mayor.
- **Inteligencia Artificial**: uso de máquinas y ordenadores para reemplazar la inteligencia humana. Sistemas que sean capaces de aprender de su entorno y tomar decisiones. Las **Redes Neuronales Artificiales** tratan de simular el razonamiento humano aplicado a modelar y simular procesos de fabricación, controlarlos, diagnosticar problemas…

Clasificación de los niveles de automatización en fabricación industrial:

- **Trabajos de Taller**: se utilizan máquinas herramienta y centros de mecanizado con elevada participación de la mano de obra. Son muy flexibles pero con baja productividad.
- **Producción autónoma de NC**: utiliza máquinas de Control Numérico, pero con elevada participación también de la mano de obra. Aumenta la producción con respecto al anterior, pero baja bastante la flexibilidad.
- **Celdas de manufactura**: utilizan conjuntos de máquinas con control integrado por ordenador y manejo flexible de materiales (incluso con robots industriales). Aumenta la producción con respecto los anteriores y mejora la flexibilidad con respecto al anterior.
- **Sistemas flexibles de fabricación**: utilizan control por ordenador en todos los aspectos de la fabricación, incorpora varias celdas de manufactura y sistemas automatizados de manejo de materiales. Aumenta la producción con respecto a los anteriores y alcanza niveles de flexibilidad similares al primero.
- **Líneas Flexibles de fabricación**: organiza la maquinaria controlada por ordenador en línea, disminuye la flexibilidad con respecto al anterior pero aumenta la productividad.
- **Líneas de flujo y líneas de transferencia**: agrupamientos organizados de maquinaria con manejo automatizado de materiales y máquinas. Estas líneas suelen tener la flexibilidad limitada, pues se busca elevadas productividades a costa de ser un sistema más rígido.

En general, ventajas de la automatización:

- **Integración** de los diferentes aspectos relacionados con la fabricación o producción, se mejora la calidad, uniformidad, tiempos de fabricación, costes…
- **Mejora la productividad**
- **Mejora la calidad (mayor repetibilidad)**
- **Menor participación humana (reduce error humano)**
- **Reduce pérdidas de piezas de trabajo por daño o fallo**
- **Mayor seguridad para el personal**
- **Minimiza la necesidad de espacio.**

## 1.10 Producción esbelta y manufactura ágil

**Producción Esbelta**: metodología que comprende una evaluación profunda de cada actividad con el objetivo de minimizar el desperdicio en todos los niveles (eficacia de todas sus operaciones, maquinaria, mano de obra…), incluye el análisis de costes. Incorpora la importancia de la cooperación y del trabajo en equipo entre la gerencia y la mano de obra.

**Manufactura Ágil**: implica el concepto de producción esbelta en un nivel superior. Este concepto persigue asegurar la flexibilidad de la industria para que pueda responder a los cambios de mercado y de demanda de los clientes. Esta flexibilidad se consigue con la colaboración de todo el equipo humano, integrado mediante el software y hardware, sistemas avanzados de comunicación…

## 1.11 Tendencias generales de la manufactura

**Materiales y Procesos.** Se tiende a mejorar las propiedades de los materiales con un mayor control en su composición (pureza e impurezas); mejorar vida útil, su reciclaje, reduciendo su coste. Existe un continuo desarrollo en los procesos de obtención de los diferentes materiales, así como en lo métodos de control de calidad; integrando el uso de sistemas informáticos avanzados, sobretodo en la obtención de productos cerámicos, carburos y composites.

Se incide mucho en el ahorro de materiales y de energía, en el desarrollo de materiales para herramientas, matrices y moldes. Existe un amplio desarrollo en software de simulación y modelado por ordenador para el diseño de materiales y la simulación de procesos de fabricación y el comportamiento de materiales ante diversas situaciones.

**Sistemas de Fabricación**. Los esfuerzos en el desarrollo se centran en el sistema de control, robótica, inspección, control de calidad, sensores y actuadotes; sistemas de comunicación, sistemas expertos, control adaptable, inteligencia artificial…

**Tendencias en organización**. Se incide mucho en la colaboración y comunicación de arriba abajo y de abajo a arriba. Comunicación y cooperación entre todos los departamentos. Importante:

- La gente es importante.
- El trabajo en equipo es fundamental.
- Hay que innovar.
- Hay que satisfacer las demandas del mercado y responder a sus continuos cambios.
- Hay que mejorar la calidad.
- Hay que satisfacer las demandas del cliente.

## 1.12 Introducción a la Metrología y la Calidad

**Metrología**: Ciencia que tiene por objeto el estudio de los sistemas de pesas y medidas.

La metrología es la ciencia de las medidas, se centra en estudiar y desarrollar técnicas y medios para medir magnitudes (longitud, masa, tiempo, temperatura…).

**Metrología Dimensional**: se centra en la medida de dimensiones.

**Metrología Ponderal**: se centra en la medida de pesos.

En esta signatura vamos a introducir el concepto de Metrología Dimensional. Con el desarrollo industrial se pasó de una fabricación artesanal, donde el factor humano era fundamental, a una fabricación industrializada, donde cada operario suele ser responsable de la fabricación de un gran número de una pieza única o de piezas diferentes. No sólo eso, la forma de producir que conocemos actualmente se basa en la *intercambiabilidad de piezas*, de forma que cualquier componente de una pieza pueda ser reemplazado por otro de idénticas características de forma rápida y sencilla. Esto se consigue sólo aumentando el control en la fabricación, controlando el acabado de las piezas (tolerancias en las dimensiones, acabado superficial, características mecánicas, verificación de las máquinas-herramientas…), llegando a la *normalización* y *estandarización* de piezas y componentes. Todo esto para conseguir el objetivo final de que una pieza fabricada por diferentes operarios y lugares del mundo, puedas ser intercambiables.

Para conseguir esta intercambiabilidad ha sido fundamental el desarrollo de la metrología, cada vez se tiene acceso a equipos que permiten obtener medidas muy precisas de forma rápida, sencilla y fiable de cualquier magnitud que queramos conocer.

**Calidad:** Propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor.

En cualquier proceso de fabricación hay determinadas características de los productos que se deben controlar para determinar si un producto es apto o no.

*Características Externas*: dimensiones, tamaño, acabado, integridad…

*Características Internas*: porosidad, impurezas, inclusiones, fragilidad, grietas, tensiones residuales…

En un producto podemos encontrar defectos originados por motivos relativos a la materia prima o al proceso de fabricación. Antes de dar salida a un producto se debe inspeccionar para:

*Asegurar la precisión dimensional.*

*Identificar productos con fallos o defectos que puedan tener consecuencias posteriores graves.*

La **calidad del producto** es un aspecto fundamental en los procesos de fabricación. La mejora de calidad continua es una prioridad de cualquier industria.

**Kaizen**: “mejora sin fin” (en japonés).

La calidad en un producto debe integrarse (verificarse) desde la concepción del propio producto y en todas sus fases productivas, no solo en la fase final (recordemos que debe existir una estrecha relación entre todas las personas responsables del ciclo completo del producto).

La importancia de la **Calidad** de los productos a nivel mundial se reconoce con la existencia de normativa (**ISO**, **QSO…**) que deben cumplir aquellas empresas que quieran asegurar para sus productos determinados niveles de calidad y ofrecérselos como tal al consumidor.

**¿Qué es ISO 9000?** Son una serie de normas:

- ISO 9000 Sistemas de Gestión de la Calidad. Definiciones y Fundamentos.
- ISO 9001 Sistemas de Gestión de la Calidad. Requisitos.
- ISO 9004 Sistemas de Gestión de la Calidad. Directrices para la mejora del desempeño.

ISO (International Standard Organization u Organización Internacional de Normalización): organismo dedicado a publicar normas a internacionales. Se basa en una norma existente de British Standard: BS-5720; desde hace años es el organismo responsable de las normas ISO 9000, referidas a los Sistemas de la Calidad.

Una norma es un documento que describe un producto o una actividad con el fin de que ese mismo producto o esa misma actividad, llevadas a cabo por diferentes empresas o personas, sean similares. El cumplimiento de una norma suele ser voluntario aunque recomendable. Gracias al cumplimiento de las normas actualmente tenemos productos y componentes intercambiables, conectables o asimilables. Las normas suelen describir parámetros básicos de aquello que normaliza, por lo que es común que dos productos que cumplen una misma norma puedan tener diferencias importantes (como por ejemplo diferentes niveles de calidad).

ISO 9001: 2000 es una norma internacional aceptada por organizaciones y empresas que indica los requisitos mínimos que un sistema de gestión de calidad debe cumplir para ser certificado. La versión de 1994 estaba formada por tres normas (UNE-EN-ISO 9001:94, UNE-EN-ISO 9002:94 y UNE-EN-ISO 9003:94) para empresas industriales que contemplaban todas las operaciones (diseño, fabricación, análisis y ensayos de calidad y los ensayos finales de los productos).

Estas normas fueron reemplazadas por la ISO 9001-2000 que establece los requisitos de un sistema de gestión de la calidad para ser certificado; la ISO 9000 se refiere a los fundamentos y el vocabulario y la ISO 9004 se ocupa de las directrices para la mejora del desempeño.

Si una organización desea certificar su sistema de calidad, deberá adecuarse a lo establecido en la norma ISO 9001:2000.

# 2 TEMA 2: SISTEMAS DE FABRICACIÓN

## 2.1 Introducción

Un **Proceso de Fabricación** se puede definir como el conjunto de diferentes fases o etapas sucesivas que tienen lugar en la operación de fabricación. Un proceso de fabricación es aquel que, partiendo de unas materias primas y aportando un valor añadido, obtiene un producto diferente que en principio satisface las necesidades del fabricante o del cliente.

El estudio de un proceso de fabricación se centra en conocer las transformaciones que se llevan a cabo (físicas, químicas o de cualquier otro tipo). El objetivo de estudiar cualquier **proceso de fabricación** es analizar todas las etapas o transformaciones y la tecnología implicada a cada etapa, existiendo siempre un gran número de posibilidades para una misma operación.

El concepto **sistema de fabricación** es más amplio que el anterior, ya que incluye todo lo relativo al tipo de máquinas, métodos, recursos, costes, plazos, calidad…

Un **Sistema de Fabricación** se puede definir como el conjunto de entidades y componentes, físicos o lógicos, que ordenadamente relacionados entre sí contribuyen al objeto de la fabricación.

El concepto **Sistema de Fabricación** es más amplio que el **Proceso de Fabricación**, ya que incluye todo lo relativo al tipo de máquinas, métodos, recursos, costes, plazos, calidad… Se podría decir que un *proceso de fabricación es una parte de un sistema de fabricación*.

Por ejemplo, suponiendo el corte de una chapa:

- En el estudio del proceso de corte de una chapa se analizaría el proceso en sí, las transformaciones sucesivas que tienen lugar y la tecnología asociada a cada secuencia. Existen muchas posibilidades de realizar el proceso de corte: láser, plasma, oxicorte, cizalla, punzonado…
- Desde el punto de vista del sistema de fabricación, la perspectiva de estudio es más amplia, abordando las diferentes alternativas relativas al tipo de máquina, métodos, recursos, costes, plazos, calidad…

En este tema hablaremos de:

- Sistemas de transferencia.
- Sistemas flexibles de fabricación.
- Robots.
- Control Numérico.
- Sistemas de Control de planta.
- Fabricación Integrada por Ordenador.

## 2.2 Sistemas de Transferencia

Este tipo de sistemas suelen ser habitual cuando **el número de piezas a fabricar es muy elevado** (grandes producciones en serie). Estos sistemas presentan dos componentes principales: el propio **sistema de transferencia o *transfer*** y determinadas **máquinas especiales** (que son las que realizan las operaciones necesarias para la fabricación de las piezas).

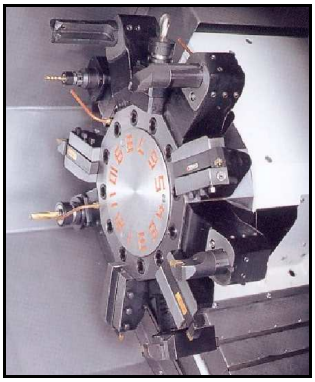


**Figura 15. Torreta con varias herramientas para torno.**

En principio se usaban **máquinas universales** capaces de realizar un gran número de operaciones, pero en este tipo de sistemas puede ocurrir que en un puesto de trabajo se utilice una máquina universal para realizar solo una operación de taladrado (no se justifica la inversión). Las **máquinas especiales** están diseñadas específicamente para realizar una tarea concreta. Es común agrupar sobre una misma máquina operaciones de la misma naturaleza (taladradoras multi-husillos, tornos con cambio de herramienta múltiple, fresas con varios cabezales…); de esta agrupación surgen las **unidades autónomas de trabajo o cabezales especiales** (elemento básico de una **máquina especial**).

**Unidades autónomas de trabajo o cabezales especiales**: están compuestas por elementos mecánicos motorizados provistos de un eje giratorio portaherramientas; alojados en un bloque que permite hacer desplazamientos de avance y retroceso. Tendremos un avance (**unidad de avance**) y un giro (**unidad de giro**).

Las unidades de avance pueden ser por *leva o neumáticas* para operaciones de poca importancia y corto recorrido, y *electromecánicas o hidráulicas* para largos recorridos, precisión y potencia.

Son comunes las operaciones de mecanizado que combinan rotación de herramienta con movimiento de avance (taladrado, roscado, fresado, ranurado, refrentado…)

**Tipos de máquinas**:

- Máquinas especiales de puesto fijo (la pieza de trabajo permanece fija y se realizan las operaciones necesarias). Estas máquinas están diseñadas para producir un producto estándar. Aunque los parámetros de producción (velocidad, avance, profundidad de corte…) se pueden modificar, suelen ser máquinas poco flexibles y muy especializadas. No suele ser posible modificarlas para producir una pieza diferente de la ya preestablecida.

- Máquinas de transferencia: están formadas por puestos múltiples coordinados, donde cada uno realiza una operación diferente y se realiza el traspaso de las piezas de trabajo de un puesto a otro (de una máquina especial a otra). Pueden ser: abiertas (lineales o en U) o

cerradas (circulares). Las lineales son menos flexibles pero permiten mayor número de puestos de trabajo que las circulares o en U.

- Mecanismos de transferencia: se utilizan para mover las piezas de un lugar a otro: rieles (Fig. 16a); mesas giratorias (Fig. 16b); trasportadores o bandas transportadoras aéreas.

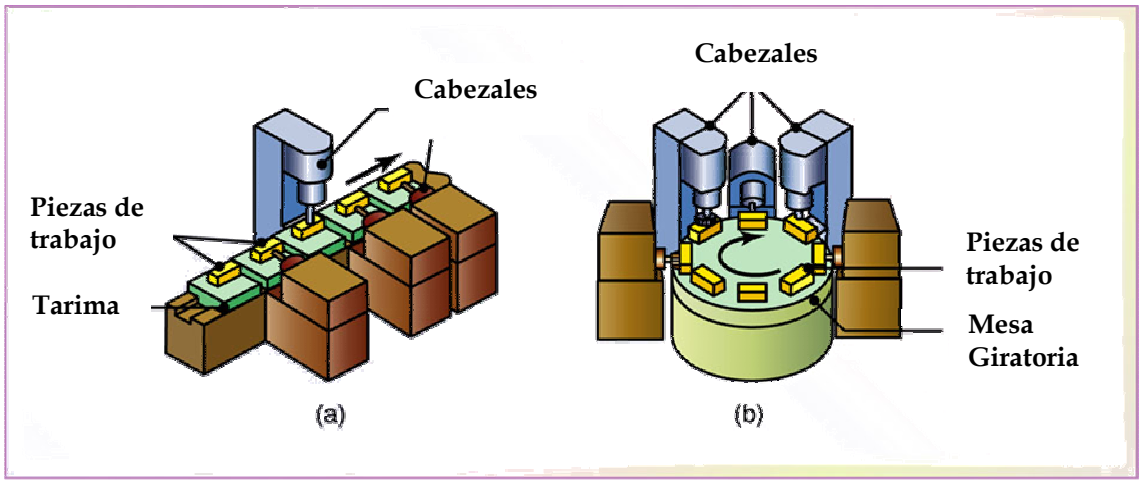



**Figura 16. Transferencia lineal (a); Transferencia circular (b).** **(Fuente [1])**

**Ventajas de este tipo de máquinas**:

- Reduce la mano de obra, el consumo de útiles, la superficie necesaria, el tiempo de fabricación, gastos de mantenimiento, piezas defectuosas.
- La normalización de los componentes básicos de este tipo de máquinas hace que estos sistemas de fabricación sean muy flexibles, pudiendo adaptarse a los cambios exigidos por el mercado. (No confundir con la poca flexibilidad de las máquinas especiales de puesto fijo; aunque estas máquinas consideradas individualmente sean poco flexibles, al conjunto se le considera bastante flexible)
- Gran uniformidad en la calidad y acabado de las piezas.

## 2.3 Sistemas Flexibles de Fabricación

Las células y sistemas de fabricación flexibles son sistemas autónomos gobernados por ordenador, compuestos por diferentes máquinas y manipuladores, capaces de estar trabajando (sin intervención externa) durante largos periodos de tiempo (24 – 48 horas); estos sistemas son capaces de modificar sus condiciones de trabajo en función del entorno.

Estos sistemas son la base de la fabricación automatizada. En estos sistemas debe haber una integración entre los sistemas de producción y los sistemas de control de planta, que además están controlados por los sistemas de gestión de producción. Cuando estos sistemas son capaces de trabajar por sí mismos pasaríamos a hablar de "Fabricación Integrada por Ordenador".

Los componentes básicos de un sistema flexible son: el sistema de control, el sistema de manipulación y el sistema de fabricación.

Los sistemas flexibles de fabricación se estudiarán más en detalle en el Tema 6.

## 2.4 Robots

**Autómata**: máquina que imita la figura y movimientos de un ser animado, término utilizado ya en la antigua Grecia.

**Robot**: término utilizado por primera vez en 1921 en la obra *Rossum's Universal Robot* del escritor checo Karen Capek (1890-1938). El término podría haber caído en desuso si no hubiera sido tan recurrido en los escritos de ciencia ficción. El escritor ruso Isaac Asimov (1920-1992) fue el máximo impulsor del término robot, fue quien enunció por primera vez las *tres leyes de la robótica*:

1. Un robot no puede perjudicar a un ser humano, ni con su inacción permitir que un ser humano sufra daño.
2. Un robot ha de obedecer las órdenes recibidas de un ser humano, excepto si tales órdenes entran en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia mientras tal protección no entre en conflicto con la primera o segunda ley.

**Telemanipuladores**: pueden considerarse los antecesores de los robots. Surgieron de la necesidad de manipular material radioactivo sin peligro para el operador. El primer manipulador consistía en un sistema mecánico *maestro-esclavo*. El maestro situado en zona segura era movido por el operador, el esclavo unido mecánicamente con el maestro reproducía los movimientos del maestro para manipular el material radioactivo. De la unión mecánica se pasó al uso de la tecnología electrónica y el servocontrol. La evolución de los telemanipuladores no ha sido tan destacada como la de los robots, quedando los primeros limitados a su uso en la industria nuclear, militar, espacial… Los telemanipuladores necesitan la presencia del maestro-operador que los maneja. Al sustituir al operador por un ordenador que controla los movimientos se pasó al concepto de **robot**.

**Figura 17. Telemanipuladores**

Los robots más conocidos quizás sean los denominados robots industriales o robots de producción, ligados a la fabricación industrial. Por otro lado, nos encontramos con los robots de servicio o robots especiales, que poco a poco se van incorporando a la vida cotidiana de las personas (robots de asistencia personal, de ayuda para discapacitados…).

**Definición de Robot industrial**: existe cierta controversia a la hora de definir el concepto de robot industrial, ya que puede variar de un país a otro.

- Para Japón un robot industrial es cualquier dispositivo mecánico destinado a la **manipulación**.
- En occidente se exige una mayor complejidad sobretodo en lo relativo al control.
- Según la *Asociación de Industrias Robóticas (RIA)*: un robot industrial es un manipulador **multifuncional reprogramable**, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.
- Según la *Organización Internacional de Estándares (ISO)*: un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable con **varios grados de libertad**, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas.
- Según la *Asociación Francesa de Normalización (AFNOR)*:
    - Manipulador: mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico.
    - Robot: manipulador automático servocontrolado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectorias variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas.
- Según la *Federación Internacional de Robótica (IFR)*: por robot industrial de manipulación se entiende a una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que puedan posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento.

**Clasificación de los robots industriales en generaciones**:

- 1ª Generación: repiten una tarea programada secuencialmente. No tiene en cuenta alteraciones de su entorno.
- 2ª Generación: adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar (visión) y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.
- 3ª Generación: se programan utilizando el lenguaje natural. Es capaz de planificar tareas de forma automática.

**Sistema robotizado**: es un concepto más amplio, incluye todos aquellos dispositivos necesarios para realizar de forma automática tareas en sustitución del ser humano, puede o suelen incorporar uno o varios robots, siendo lo más frecuente.

**Definición de Robot de servicio**: dispositivos electromecánicos móviles o estacionarios, dotados normalmente de uno o varios brazos mecánicos independientes, controlados por un programa de ordenador y que realizan tareas no industriales de servicio. En esta categoría entrarían aquellos robots destinados a cuidados médicos, educación, domésticos, intervención en ambientes peligrosos, aplicaciones espaciales, submarinas, agrícolas. Esta clasificación excluye a los telemanipuladores.

**Estructura de un robot**: un robot suele estar constituido por una serie de eslabones unidos mediante articulaciones que permiten el movimiento relativo de un eslabón respecto otro. Las articulaciones podrán tener 1 (prismática), 2 (planar) o 3 (rótula) grados de libertad según el tipo. El número de grados de libertad total del robot vendrá dado por el número y tipo de articulaciones. En la Figura 18 se muestran las configuraciones más comunes en los robots. El grado de libertad de un robot se define como el número de movimientos que puede realizar el robot en el espacio. La estructura del robot industrial suele denominarse por **brazo** y **muñeca**. Suelen tener 6 grados de libertad (3 en el brazo y tres en la muñeca).

**Según la estructura del robot, se pueden considerar cuatro estructuras básicas**:

- Polar: el brazo telescópico describe o se mueve en un volumen de una esfera o semiesfera.
- Cilíndrica o tipo SCARA: el extremo del brazo o actuador puede moverse en el volumen comprendido entre dos cilindros concéntricos.
- Cartesiana: el extremo se puede desplazar en el volumen incluido en un paralelepípedo.
- Antropomórfico, de brazo articulado o angular: generalmente con la forma de un brazo humano.

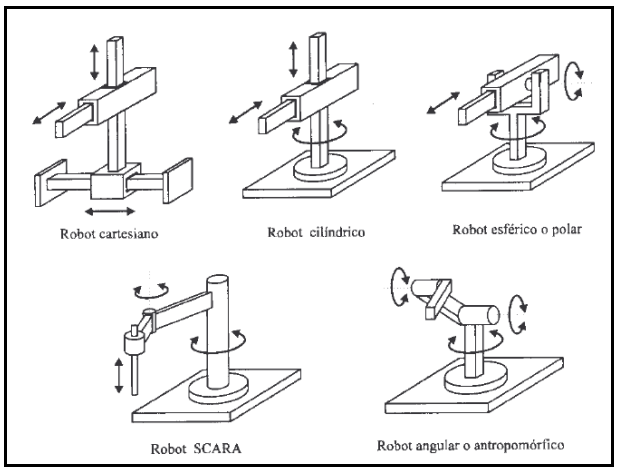



**Figura 18. Principales configuraciones en robots industriales. (Fuente [3])**

**Volumen de trabajo**: se refiere al espacio físico que es accesible por el robot (por el actuador final del robot).

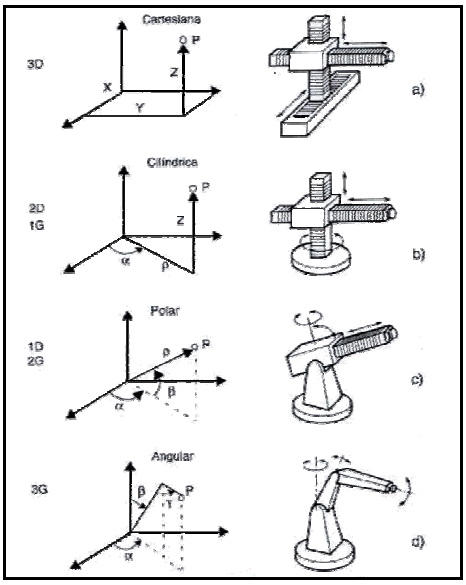



**Figura 19. Volúmenes de trabajo para diferentes configuraciones de robots.**

**Actuador o efector final**: es el encargado de realizar las operaciones de manipulación para las que esté destinado el robot. En Fabricación industrial los más comunes son: pinzas para manipular, herramientas de trabajo (pistola de pintar, electrodos de soldadura, atornillador-desatornillador, taladros, ventosas de vacío para coger piezas planas, electroimanes, cucharas para fundición, sensores…).

**Fuente de potencia**: cada movimiento o grado de libertad del robot (ya sea lineal o rotacional) se controla y regula con actuadotes independientes (eléctricos, neumáticos o hidráulicos). Cada fuente de energía tiene sus propias características, ventajas e inconvenientes.

**Sensores**: el avance de la tecnología y de la programación permite la existencia de robots capaces de realizar operaciones programadas y además, modificar esas operaciones en función de su entorno. Para esto, es necesario dotar al robot de sensores que transformen en una señal eléctrica la magnitud que se quiera considerar. Algunos sensores: **mecánicos** (miden posición, forma, velocidad, fuerza, presión, vibración…), **eléctricos** (voltaje, corriente…), **magnéticos** (campos magnéticos, flujo, permeabilidad), **térmicos** (temperatura, flujo de calor, conductividad, calor específico) y otros (acústicos, ultrasonidos, químicos, ópticos, de radicación…) [1].

**Aplicaciones**: los tres principales campos de actuación son:

- Carga y descarga: manipulación física de piezas para transportarlas de un puesto de trabajo a otro, a la hora de diseñar el robot se tendrá que tener en cuenta:
    - Orientación y posicionamiento de las piezas.
    - Tipo de pinza o efector final.
    - Volumen de trabajo requerido.
    - Peso total (robot+pieza) --- Potencia necesaria.
    - Grados de libertad.
    - Precisión y repetitividad.

- Operaciones de procesado: el efector final del robot realiza alguna operación sobre la pieza. La operación puede ser de fabricación (soldadura, pintura, mecanizado…) o de control de calidad (selección mediante visión artificial, control de medidas, control de acabados…); ambas operaciones dan valor añadido a las piezas.

- Operaciones de montaje y acabado: en estas operaciones, además de las precauciones de elección del actuador final adecuado, volumen de trabajo…, hay que tener en cuenta que el sistema de alimentación de las piezas hacia el robot debe asegurar la posición correcta de llegada de las piezas. En estas operaciones son fundamentales el control de la posición y el control de esfuerzos.

Una **clasificación** amplia de robots actualmente en uso es la siguiente:

- **Robots de secuencia fija y variable**: **Fija:** se programan para una secuencia específica de operaciones (es común la de coger una pieza y llevarla a otro sitio). Los movimientos suelen ser de punto a punto y el ciclo se repite de forma continua. **Variable:** igual que el anterior, pero es posible reprogramarlo.
- **Robot reproductor con movimiento**: un operador hace que el robot reproduzca los movimientos (trayectorias) y operaciones; el robot registra toda la secuencia de movimientos y es capaz de reproducirla automáticamente.
- **Robot controlado numéricamente**: se programa como una máquina CNC, mediante un lenguaje de programación propio. Se puede reprogramar tantas veces se quiera. Se pueden programar movimientos punto a punto o trayectorias.
- **Robot inteligente (sensorial)**: es capaz de realizar algunas tareas y funciones como los humanos. Presenta sensores de visión, táctiles o de contacto; el robot puede observar y analizar su entorno, evaluarlo (siguiendo patrones) y tomar decisiones.

**Vehículos autoguiados**: se puede considerar como un robot al que se le ha dotado de capacidad de movimiento o desplazamiento. Al igual que en un robot, tendremos el vehículo y el ordenador que lo gobierna. Quizás la principal diferencia sea que en un vehículo la comunicación con el ordenador debe ser sin cables (transmisión mediante infrarrojos, por radio) con los inconvenientes que pueda tener (deba haber contacto visual con entre el vehículo y el puesto de control, en el caso de los infrarrojos, o que pueda haber interferencias). Principales tipos de vehículos: sobre ruedas (simples u orugas), patas, para interior de tubos o conductos, exploración submarina.

## 2.5 Control Numérico

El control numérico de las máquinas-herramienta no surgió de la necesidad de automatizar la producción, sino de la necesidad de fabricar piezas muy complejas para la industria aeronáutica, imposibles de conseguir con métodos convencionales. El control numérico se basa en el control de las trayectorias y operaciones de máquinas-herramienta (tornos, fresadoras, centros de mecanizado, máquinas de corte…) mediante ordenador, utilizando lenguajes de programación que se basan principalmente en líneas de código o comandos expresados por números (y letras). Aunque en la actualidad, existen muchas máquinas en las que el código que se utiliza para programar las máquinas utiliza comandos más complejos que no sólo utilizan líneas de código numéricas (y letras).

El Control Numérico se estudiará más en detalle en los Temas 3 y 4.

## 2.6 Sistemas de Control de Planta

En producción se pueden distinguir diferentes niveles jerárquicos de control a modo de estructura piramidal (a veces denominados subsistemas) (**Pirámide CIM**). En cada nivel se toman decisiones y se genera información que afecta a los niveles inferiores, los cuales a su vez informan a los niveles superiores sobre las operaciones realizadas necesarias para alcanzar los objetivos establecidos.

- **Nivel 0**: dispositivos y sensores de control activo (reguladores, actuadores, transductores, sensores, medidores…).
- **Nivel 1**: controladores de máquinas y procesos (máquinas-herramienta CNC, robots, manipuladores…).
- **Nivel 2b**: dirección de célula (supervisa las actividades llevadas a cabo en los procesos de producción, coordina las tareas del proceso y se encarga de la conexión con los dispositivos de control).
- **Nivel 2a**: dirección de área (enlace entre niveles para la coordinación de tareas y análisis de datos de proceso, informes y planificación a corto plazo).
- **Nivel 3**: dirección de planificación (planifica a medio plazo los recursos productivos de la empresa, establece el plan de calidad a seguir y se realiza el diseño de los procesos productivos y de los productos).
- **Nivel 4**: dirección estratégica (establece los objetivos a alcanzar, evalúa los resultados y gestiona al personal y otros activos).

En los niveles 2a y 2b se distribuye la información generada en los niveles 3 y 4 a los niveles inferiores. En los niveles 3 y 4, la toma de decisiones y el flujo de información puede durar años, en los niveles 2 la información se transmite a los niveles inferiores en días.

**Sistemas de control de planta (SCADA: *Supervisory, Control And Data Adquisition System*)**: abarca a todos los sistemas de información encargados de recoger de forma flexible datos de una red de telemedida y control, supervisar los datos, analizarlos y producir señales de control avanzado. Algunas de las funciones más comunes son:

- Plataformas de integración de dispositivos.
- Bases de datos en tiempo real.
- Histórico y generador de informes.
- Gestión de alarmas.
- Interfaz hombre-máquina.
- Unidad de programación.
- Funciones complementarias.

## 2.7 Fabricación Integrada por Ordenador

La Fabricación Integrada por ordenador se basa en los niveles jerárquicos de control vistos en el apartado anterior.

**CIM** (*Computer Integrated Manufacturing* o *Manufactura Integrada por Ordenador*): integración computerizada de todos los aspectos de diseño de productos, planificación de procesos, producción y distribución, administración y funcionamiento de toda la organización de la empresa, fábrica o industria. A los niveles jerárquicos vistos anteriormente se le suele denominar la **Pirámide de CIM**. Permite:

- Automatizar la producción.
- Optimizar continuamente la programación y productividad de las instalaciones.
- Coordinar y asignar recursos.
- Controlar el flujo de información de materiales y operaciones.

**No existe un sistema universal válido para cualquier empresa.** Este tipo de sistemas maneja un volumen de datos muy elevado y requiere de una fuerte inversión en ordenadores, máquinas, equipos de control, software… por lo que el coste de su implementación es muy elevado, no suele ser asumible para pequeñas o medianas empresas.

Este sistema requiere de un buen sistema de adquisición de datos y una base de datos con toda la información de la empresa que compartan todos los niveles o departamentos. Esta base de datos debe recopilar información actualizada de todo tipo (productos, diseños, materias primas, máquinas, procesos, ventas, compras, finanzas, comercialización…). Algunos elementos que suelen contener estas bases de datos son:

- Datos del producto: forma, dimensiones y especificaciones de diseño.
- Administración de datos: nivel de revisión y número de partes.
- Datos de producción: sistemas de producción utilizados…
- Datos operativos: calendario, lotes producidos, requisitos de ensamblaje…
- Datos de recursos: capital, maquinaria, utillaje, materia prima, mano de obra…

Dentro de la fabricación integrada por ordenador podemos hablar de los siguientes casos, algunos de los cuales han sido mencionados anteriormente y serán tratados más en profundidad en temas sucesivos:

- **Fabricación Celular:** una celda de manufactura es una pequeña unidad formada por varias estaciones de trabajo. Una estación de trabajo puede contener una o varias máquinas, cada máquina realizará una operación sobre la pieza de trabajo. Las máquinas pueden modificarse, cambiar sus herramientas e incluso cambiar de línea de producción dentro de una misma familia (o tipología de celdas). Las máquinas suelen ser para mecanizado (tornos, fresadoras…) o para el conformado de chapas (cizallas, troqueladoras, plegadoras, doblado…); también pueden incorporar máquinas CNC. También suelen incorporar los equipos que se encargan de la inspección y pruebas de calidad sobre las piezas fabricadas. Operaciones básicas:
    - Carga y descarga de materia prima y piezas en las estaciones de trabajo.

- Cambio de herramientas en las estaciones de trabajo.
- Transferencia de piezas de trabajo y herramientas entre estaciones de trabajo.
- Control y planificación total de las operaciones en la celda.

- **Celdas de manufactura flexibles:** se les denomina así aquellas celdas de trabajo que presentan mayor flexibilidad al incorporar centros de mecanizado y/o máquinas-herramienta CNC, robots u otros sistemas mecanizados.

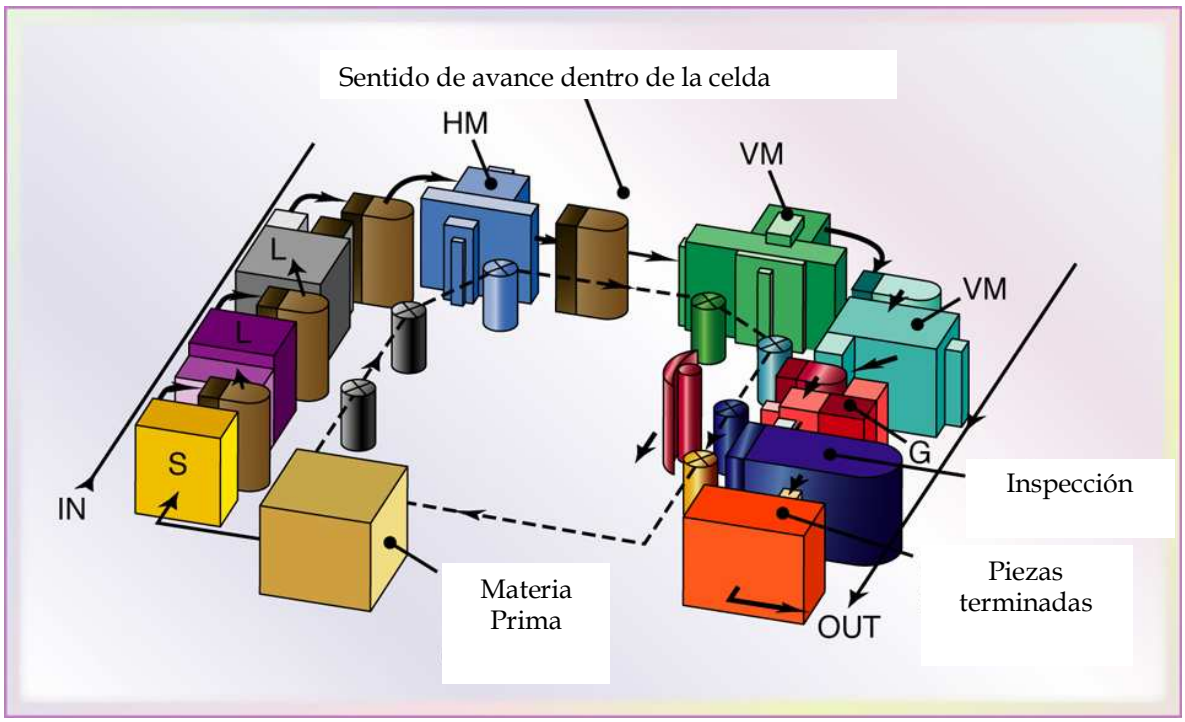



**Figura 20. Celda Flexible. S: sierra; L, tornos; fresadora horizontal; VM, fresadora vertical; G, rectificadora; x, posiciones de los trabajadores.** **(Fuente [1])**

- **Sistemas Flexibles de Fabricación:** este tipo de sistemas integran todos los elementos más importantes de un sistema altamente automatizado. Suele estar formada por varias celdas de manufactura, cada una con un robot industrial que da servicio a diversas máquinas CNC, con un sistema automatizado de materiales, todo ello gobernado por un ordenador central [Tema 6].
- **Fabricación Holónica:** nuevo concepto que describe una organización de unidades de fabricación en la que cada componente o unidad de fabricación (podemos llamarlos holones) es una entidad **independiente** y además una **parte subordinada** de la organización jerárquica. Tres aspectos importantes:
  - Los sistemas complejos se desarrollan a partir de sistemas más simples de forma más rápida si tenemos componentes intermedios estables (los holones).
  - Las partes independientes pueden resolver problemas sin tener que depender de otras unidades o de entidades superiores.
  - Una oligarquía está formada por (a) elementos autónomos a cargo de sus propias partes; (b) partes dependientes controladas por superiores; (c) todas coordinadas de acuerdo a las condiciones locales.

- **Sistema "Just in Time":** aunque se originó en Estados Unidos, se implantó a gran escala en Japón (Toyota Motor Company), donde la disponibilidad de suelo para sus industrias está muy limitada. Objetivos:
    - Recibir los suministros justo en el momento que hagan falta.
    - Producir las partes justo en el momento que se necesiten para ser ensambladas.
    - Producir y entregar las piezas finales justo a tiempo para su salida de la fábrica y venta.

  En este sistema no existen almacenes, las partes se inspeccionan a medida que se van fabricando. Cada estación de trabajo es responsable de la calidad de sus piezas, el control de calidad no se reduce a un control final. Este sistema requiere de la entrega puntual de todos los suministros y la salida puntual de todos los pedidos realizados. Ventajas:
    - Coste bajo de control de inventarios.
    - Rápida detección de defectos, baja pérdida pro desperdicios.
    - Reducción de la necesidad de inspecciones.
    - Se obtienen productos de alta calidad a bajo coste.

  **Kanban ("registro visible" o "tarjeta" en japonés)** originariamente consistían en dos tipos de tarjetas:
    - *Tarjetas de producción*: autorizan al operario que reciba un contenedor con piezas y dicha tarjeta a realizar la operación que indique.
    - *Tarjetas de transporte o movimiento*: autorizan el movimiento de un contenedor con piezas de una estación de trabajo a otra.

- **Fabricación Esbelta:** las fábricas deben dar respuesta a las demandas del cliente y del mercado. Además deben producir la cantidad mínima de desperdicio para ser más competitivos. Este sistema se basa en identificar y reducir el desperdicio en todos y cada uno de los niveles de fabricación. Cuando se aplica a gran escala se conoce como *Fabricación Ágil*. Estos dos términos ya fueron comentados en el Tema 1. Desde este punto de vista una actividad puede:
    - Dar valor añadido al producto.
    - No dar valor añadido pero no poder ser eliminada.
    - No dar valor añadido y poder ser eliminada → eliminar para reducir desperdicio

  Estos sistemas incluyen:
    - Los métodos de "**Just in Time"**, para eliminar inventario.
    - Eliminar tiempos de espera en zonas de trabajo.
    - Eliminar pasos innecesarios.
    - Minimizar el transporte de productos a actividades que no agreguen valor añadido.
    - Estudiar los tiempos de fabricación y movimientos para identificar operarios ineficientes o movimientos no necesarios.
    - Eliminar defectos en componentes y piezas.

# 3 TEMA 3: PROGRAMACIÓN DE MÁQUINAS-HERRAMIENTA MEDIANTE CÓDIGO NUMÉRICO

## 3.1 Introducción

En este tema primero haremos un breve repaso de los contenidos adquiridos en la asignatura "Tecnología de la Fabricación" de 1er curso para a continuación hablar del control numérico en máquinas-herramienta. Los contenidos de este tema son:

- Fundamentos de Mecanizado (*REPASO*).
- Materiales para herramientas de corte y fluidos de corte (*REPASO*).
- Control Numérico.
- El torno CNC.
- La fresadora CNC.
- Máquinas de corte CNC (Oxicorte).
- Programación en tornos CNC con lenguaje avanzado.

## 3.2 Fundamentos de Mecanizado

El mecanizado o conformado por arranque de viruta es un procedimiento que permite modificar formas, dimensiones y/o el grado de acabado superficial de piezas obtenidas con otros procesos de fabricación. Esta transformación o modificación se realiza arrancando capas de metal (o creces de mecanizado) que se transforman en viruta.

Este tipo de operaciones suelen realizarse en piezas fabricadas mediante fundición, deformación plástica… para perfeccionar sus cotas y acabado superficial. El mecanizado no se debe entender como la solución única para obtener una determinada geometría, debido al elevado coste que supone el arranque excesivo de material. El mecanizado debe combinarse con otros procesos de fabricación.

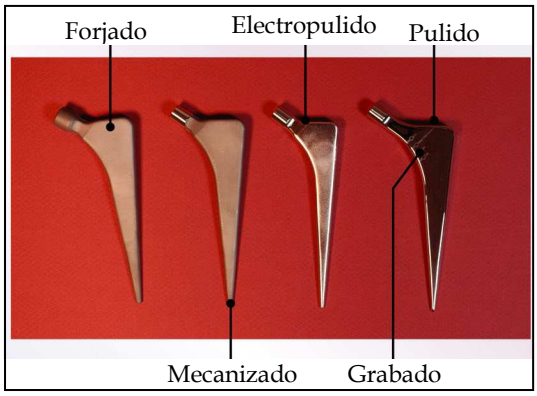



**Figura 21. Etapas de fabricación de una prótesis de cadera mediante forjado. (Fuente [1])**

Otro aspecto importante a tener en cuenta es que las propiedades mecánicas que se consiguen mediante mecanizado son muy inferiores a las que se consiguen con la deformación plástica,

sobretodo por la orientación de los granos según la geometría externa que se consigue con el conformado plástico, no ocurriendo así en trabajos de mecanizado.

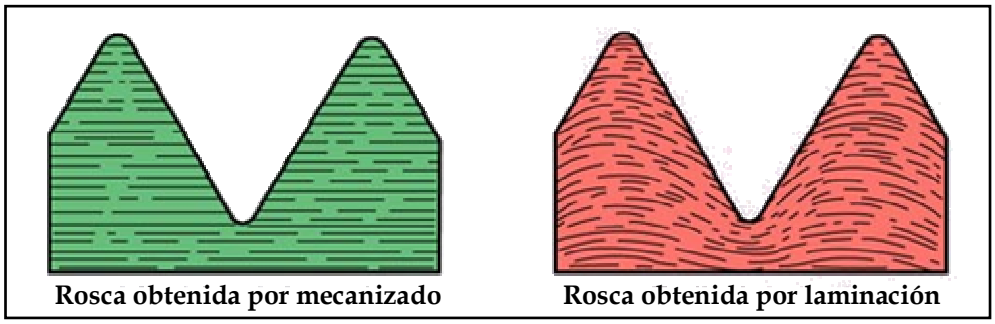



**Figura 22. Flujo de los granos en una rosca mecanizada u obtenida por laminación.** **(Fuente [1])**

Algunos **inconvenientes generales** del mecanizado:

- Desperdicio de material.
- Requiere más tiempo que otros procesos de conformado.
- Requiere más energía que otros procesos de moldeado y formado.
- Puede tener efectos negativos sobre la calidad de la superficie y las propiedades del producto.

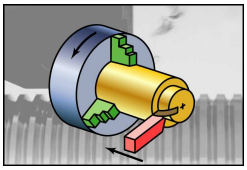
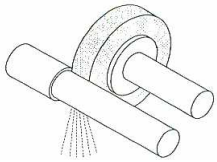
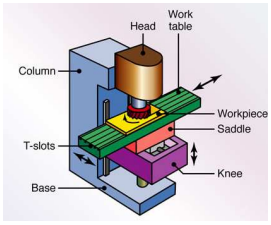
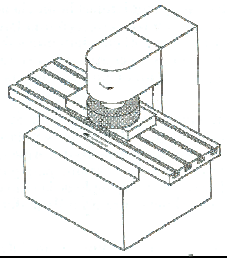
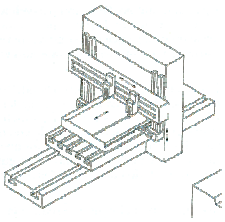
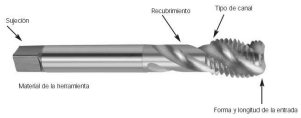
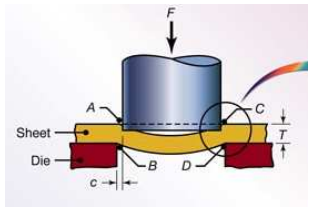
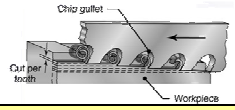
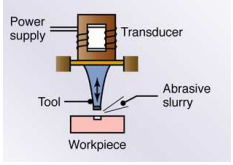
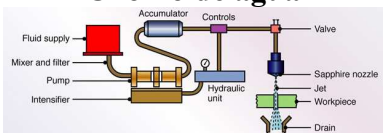
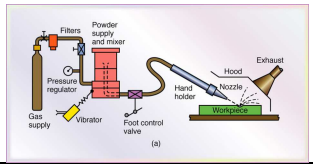
**Principales movimientos en mecanizado**:

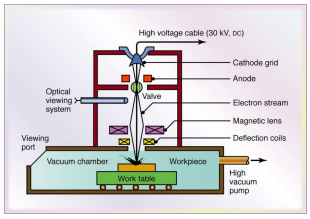
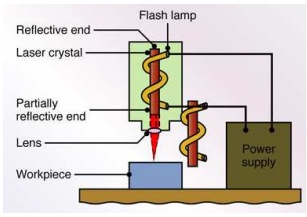
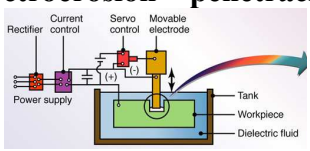
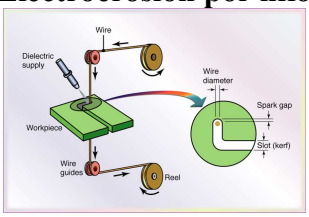
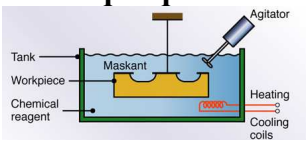
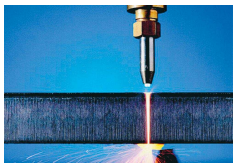
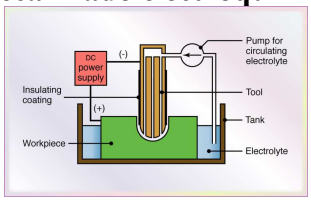
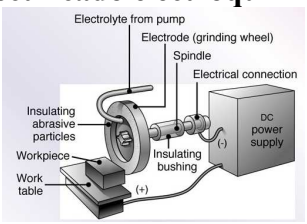
- **Movimiento de Corte**: es el responsable del proceso de eliminación del material. Lo puede realizar la pieza o la herramienta. Este movimiento consume la mayor parte de la potencia necesaria para realizar el trabajo. Aunque en muchas máquinas el movimiento de corte se asocia con el giro de la pieza (torno) o con el giro de la herramienta (fresa), en algunos casos no es un movimiento de giro (brochadora, cepillado, limado…)

- **Movimiento de Avance**: permite que en la zona de corte haya nuevas partes de la pieza a mecanizar hasta que se completa la operación o la pasada correspondiente. Lo puede realizar la pieza o la herramienta. Pueden existir varios movimientos de avance simultáneos.

- **Movimiento de Penetración**: asegura la interferencia entre la pieza y la herramienta, para que pueda existir la eliminación del material, y asegura que la pieza tenga la dimensión adecuada después de cada pasada. Suele ser un movimiento intermitente, que se efectúa cuando no se está produciendo el arranque de material, es decir, antes de comenzar una operación elemental de mecanizado.

**Clasificación General de los procesos de mecanizado (Fuente [1]):**

<table>
<tr><th colspan="4">PROCESOS MECÁNICOS</th></tr>
<tr><th colspan="4">Corte</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Superficie Revolución</td><td colspan="2">Torno<br>  </td><td>Rectificado Cilíndrico<br>  </td></tr>
<tr><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Superficie Plana</td><td>Fresa<br>  </td><td>Rectificado Plano<br>  </td><td>Cizallado<br> </td></tr>
<tr><td>Cepillado<br>  </td><td>Limadora.<br>Mortajadora o<br>Limadora Vertical</td><td>Aserrado<br> </td></tr>
<tr><td rowspan="2">Agujeros</td><td>Taladrado<br> </td><td>Roscado<br>  </td><td>Punzonado<br>  </td></tr>
<tr><td colspan="2">Troquelado</td><td>Brochado<br>  </td></tr>
<tr><th colspan="4">Mecanizado Ultrasónico</th></tr>
<tr><td>Superficie Plana</td><td colspan="3">  </td></tr>
<tr><th colspan="4">Abrasivos</th></tr>
<tr><td>Superficie Plana</td><td>Chorro de agua<br>  </td><td>Chorro abrasivo<br>  </td><td>Chorro de agua + abrasivo</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th colspan="3">PROCESOS TÉRMICOS</th></tr>
<tr><th colspan="3">Térmico</th></tr>
<tr><td>Superficie plana</td><td colspan="2">Corte por Fusión</td></tr>
<tr><th colspan="3">Eléctrico</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Superficie plana</td><td>Haz de electrones – Plasma<br> 
</td><td>Láser<br> 
</td></tr>
<tr><td>Electroerosión – penetración<br> 
</td><td>Electroerosión por hilo<br> 
</td></tr>
<tr><th colspan="3">PROCESOS QUÍMICOS</th></tr>
<tr><th colspan="3">Erosión selectiva</th></tr>
<tr><td>Superficie Plana</td><td>Ataque químico<br> 
</td><td>Grabado ácido</td></tr>
<tr><th colspan="3">Combustión - Oxidación</th></tr>
<tr><td>Superficie Plana</td><td colspan="2">Oxicorte<br>  </td></tr>
<tr><th colspan="3">Electro químico</th></tr>
<tr><td>Superficie Plana</td><td>Mecanizado electroquímico<br> 
</td><td>Rectificado electroquímico<br> 
</td></tr>
</table>

**Principales movimientos en mecanizado para algunas operaciones básicas**

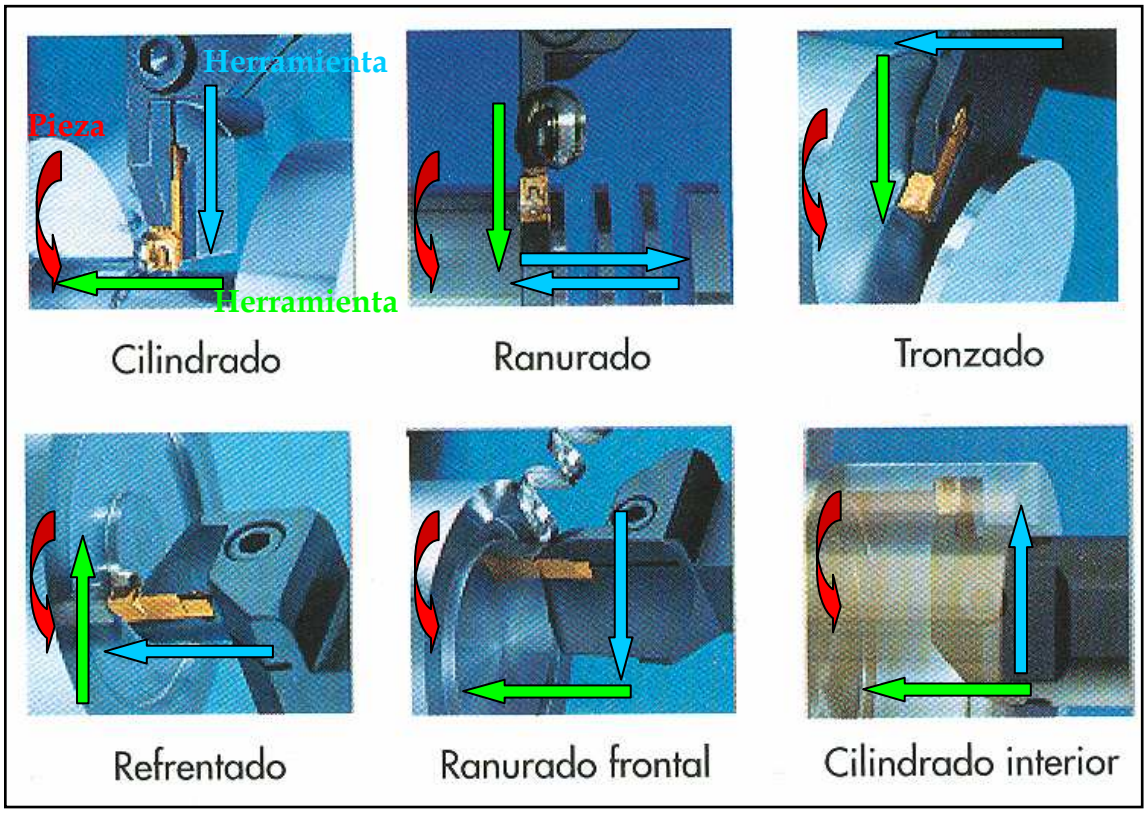



**Figura 23. Movimientos de Corte (■), Avance (■) y Penetración (■) en operaciones de mecanizado en torno.** (Fuente [2])

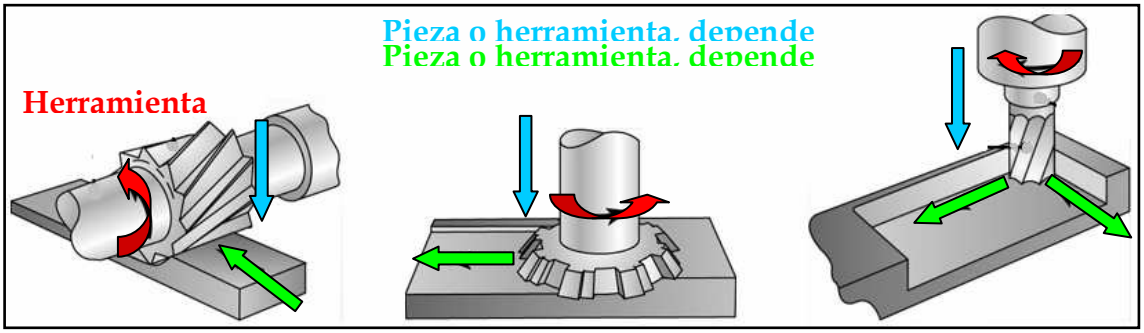



**Figura 24. Movimientos de Corte (■), Avance (■) y Penetración (■) en operaciones de mecanizado en fresa.** (Fuente [1])

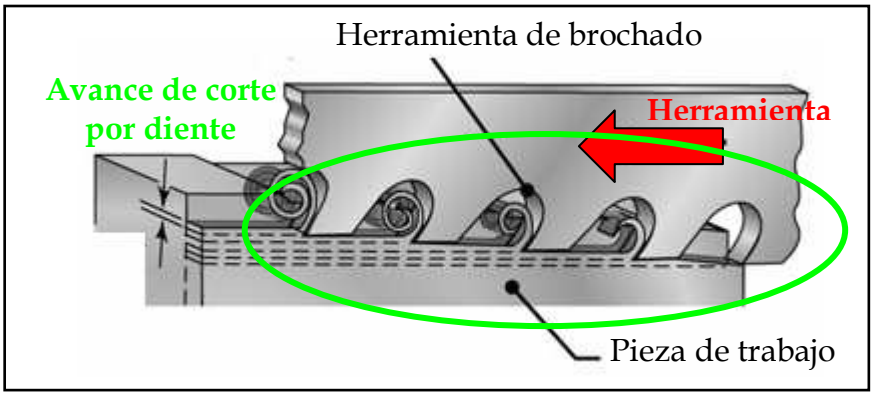



**Figura 25. Movimientos de Corte (■) y Avance (■) en brochadora.** (Fuente [1])

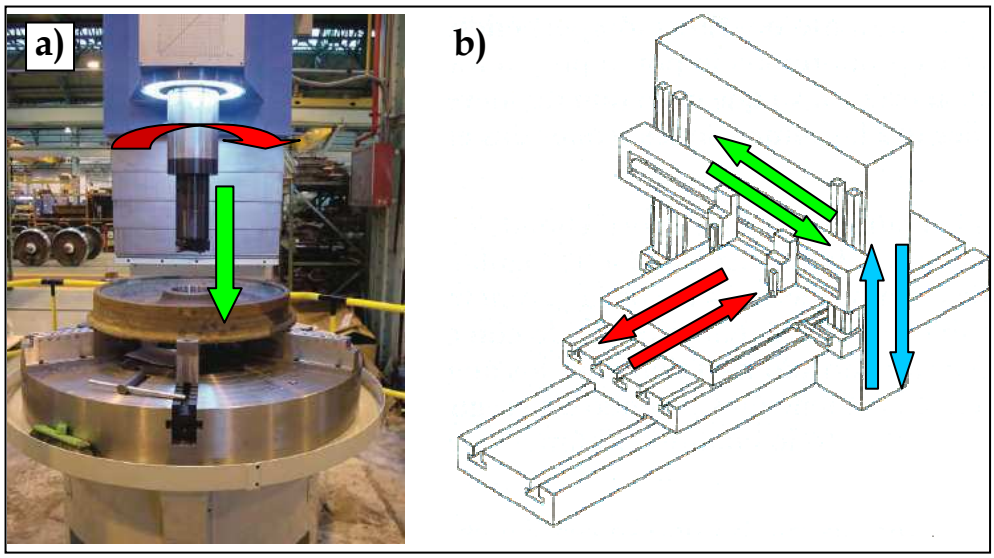



**Figura 26. Movimientos de Corte (■), Avance (■) y Penetración (■) en taladradora (a) y en cepillo (b). (Fuente [2])**

**Principales Factores a considerar en una operación de mecanizado:**

En cualquier proceso de mecanizado podemos diferenciar entre variables o factores independientes esenciales en el proceso de corte y variables dependientes; estas últimas se verán afectadas por las primeras. Cuando los resultados en una operación de mecanizado sean inaceptables la resolución del problema requiere una investigación sistemática; primero hay que analizar que variable independiente hay que cambiar y cómo ("prueba-error").

***Variables independientes***: material y recubrimiento de la herramienta; forma, acabado superficial y filo de la herramienta; material y condiciones de la pieza de trabajo; avance, velocidad y profundidad de corte; fluidos de corte; tipo de máquina – características; sujeción y soporte de la pieza de trabajo.

***Variables dependientes***: tipo de viruta; fuerza y energía disipada; temperatura en la pieza, herramienta y viruta; desgaste o rotura de la herramienta; acabado superficial.

**Algunas relaciones entre variables independientes y dependientes (Fuente [1]):**

| Parámetro | Influencia |
|---|---|
| Velocidad de corte; profundidad de corte, avance, fluidos de corte | Fuerza, potencia, temperatura, vida útil herramienta, tipo de viruta, acabado superficial. |
| Ángulos de la herramienta | Idem; dirección flujo viruta; desgaste herramienta; astillado herramienta |
| Viruta continua | Buen acabado superficial; fuerzas estables de corte; poco deseable en máquinas automatizadas (dificultad expulsión viruta, riesgo de bloqueo de la herramienta). |
| Viruta con recrecido (Filo de recrecido) | Acabado superficial deficiente; si es delgado y estable puede proteger la superficie de acabado. |
| Viruta discontinua | Facilidad de expulsión de viruta; fuerzas fluctuantes de corte; puede afectar al acabado superficial; vibraciones. |
| Elevada temperatura | Vida útil de la herramienta; precisión dimensional de la pieza; daño térmico en superficies de trabajo. |
| Desgaste de la herramienta | Acabado superficial; precisión dimensional; temperatura; fuerza; potencia. |
| Maquinabilidad | Relacionada con la vida útil de la herramienta, acabado superficial; fuerzas; potencia; tipo de viruta. |

**Parámetros del corte ortogonal:**

La herramienta de corte más sencilla es la cuchilla recta, formada por una barra de sección cuadrada, con un extremo afilado en forma de cuña.

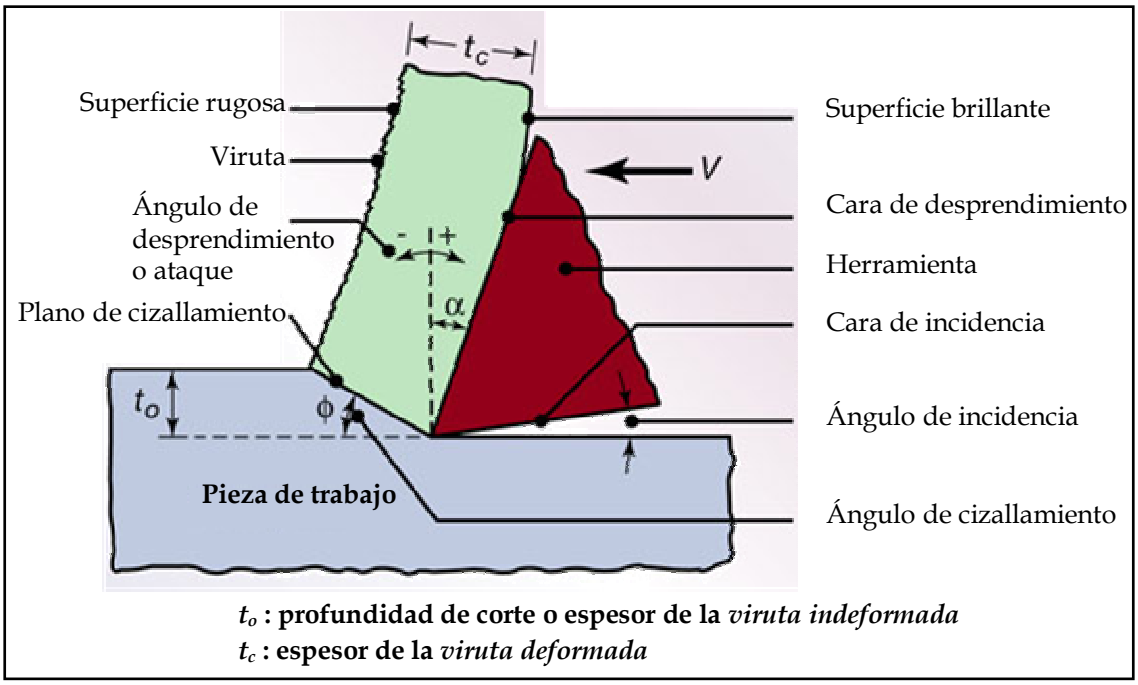



**Figura 27. Herramienta Elemental. (Fuente [1])**

Cara de desprendimiento: cara sobre la que desliza la viruta separada de la pieza de trabajo.

Cara de incidencia: cara de la herramienta que queda enfrentada a la superficie ya mecanizada de la pieza de trabajo.

Ángulo de desprendimiento ($\alpha$): ángulo formado entre la cara de desprendimiento y la normal a la superficie mecanizada. Parámetro muy importante en la formación de la viruta, pues el arranque de la viruta se provoca por la acción combinada del filo de corte y la cara de desprendimiento. La cara de desprendimiento es la que determina la deformación plástica del material, provocando la separación de la viruta.

La elección de este ángulo depende del tipo de viruta que se forma:

- Viruta continua (en forma de hélice). Típicas de materiales tenaces (aceros dulces, aluminios, aleaciones ligeras…). Existe mayor rozamiento con la cara de desprendimiento, se produce mayor calor. Para reducir este efecto se suele trabajar con ángulos grandes (10º - 40º).
- Viruta discontinua. Típicas de materiales duros y/o frágiles. Generan menos rozamiento (0º-10º)

A mayor ángulo, menor ángulo de herramienta, por lo que ésta se debilita. Para materiales duros no se puede trabajar con ángulos excesivos de desprendimiento. A veces da buenos resultados trabajar con ángulos negativos.

Ángulo de incidencia ($\gamma$): ángulo formado entre la cara de incidencia y la superficie de la pieza mecanizada. Evita el roce del talón de la herramienta con la cara mecanizada. Después del arranque del material, la parte de la pieza liberada de la presión de la herramienta tiende a dilatarse por su propia elasticidad.

Si este ángulo fuese nulo, la herramienta rozaría con la superficie de la pieza, provocando el calentamiento de la herramienta y empeorando la calidad superficial. Siempre debe existir un ángulo de incidencia positivo. Debe de ser lo menor posible para no debilitar la herramienta. Una vez que se ha conseguido que la herramienta no contacte con la cara mecanizada, no tiene sentido seguir aumentando este ángulo. Valores habituales: acero rápido entre 6º-14º; metal duro 5-12º.

Ángulo de la herramienta ($\beta$): éste ángulo depende de los anteriores, y no debe ser demasiado pequeño para asegurar la integridad de la herramienta:

$$\beta = 90º-(\alpha+\gamma)$$

Plano de cizallamiento: por lo general las virutas se producen por *cizallamiento* a lo largo de una zona, generalmente según un plano bien definido con un ángulo de *cizallamiento* $\phi$.

Relación de corte: el espesor de la viruta ($t_c$) se puede determinar conociendo la profundidad de corte ($t_o$) y los ángulos de desprendimiento ($\alpha$) y de cizallamiento ($\phi$):

$$r = \frac{t_o}{t_c} = \frac{sen\,\phi}{\cos(\phi-\alpha)}$$

siendo $r$ la relación de corte (o relación de espesor de viruta). El espesor de la viruta siempre es mayor que la profundidad de corte, $r$ será siempre menor que 1. Al recíproco de $r$ se le llama *relación o factor de compresión de la viruta*; este parámetro expresa en tanto por 1 el ensanchamiento de la viruta respecto a la profundidad de corte fijada. Esta relación de corte es un parámetro muy útil para establecer las condiciones de trabajo en función del tipo de viruta que se quiera obtener, que a su vez depende del tipo de material, tipo de herramienta, máquina…

**Tipos de viruta.**

Se define viruta como el exceso de material eliminado en los procesos de mecanizado.

Propiedades: es siempre de material más duro y frágil que la pieza; puede distinguirse a simple vista la zona de la viruta que ha estado en contacto con la cara de desprendimiento (brillante y pulida) de la zona opuesta (rugosa); el espesor de la viruta es siempre mayor que el espesor teórico de la viruta o espesor de "viruta indeformada".

Al mecanizar materiales frágiles (o materiales dúctiles a bajas velocidades) se obtiene una **viruta discontinua** (fragmentos de material de corta longitud). La viruta está poco tiempo en contacto con la cara de desprendimiento, la longitud de contacto es baja. Esto permite seleccionar ángulos de desprendimiento muy bajos. Son típicas de:

- Materiales frágiles.
- Materiales con inclusiones duras e impurezas.
- Velocidades de corte muy bajas o muy altas.
- Grandes profundidades de corte.
- Ángulos de ataque pequeños.
- Escasez de fluido de corte.
- Poca rigidez en el portaherramientas o en la máquina, lo que genera vibraciones.

Entre las virutas discontinuas y continuas nos encontramos con las **virutas aserradas o segmentadas o no homogéneas** (semicontinuas), suelen producirse en metales con baja conductividad térmica y baja resistencia.

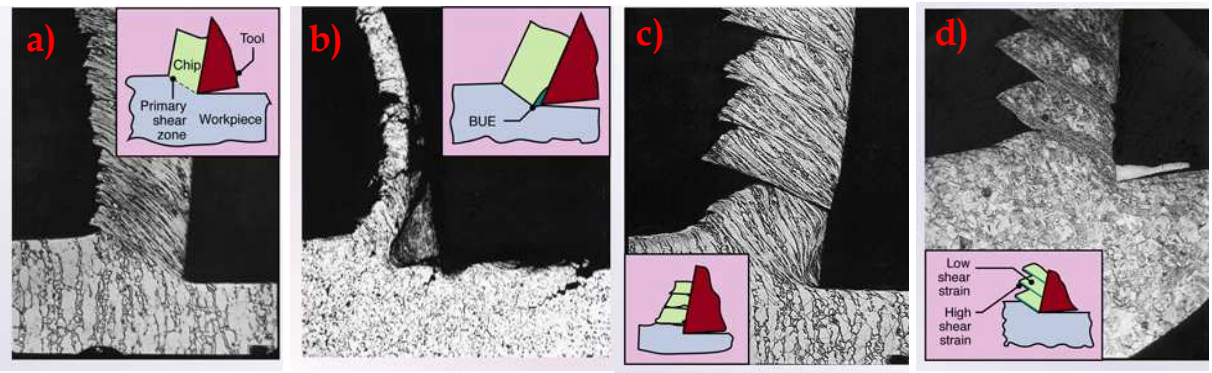



**Figura 28. Tipos de viruta: continua (a); con filo de recrecido (b); aserrada (c); discontinua (d).** **(Fuente [1])**

Al mecanizar materiales dúctiles con altas velocidades de mecanizado o con ángulos elevados de ataque la **viruta** formada es **continua** o plástica. Por tanto, la longitud de contacto con la cara de desprendimiento es elevada, siendo necesario operar con ángulos de desprendimiento elevados para disminuir el rozamiento y desgaste de la herramienta. Con este tipo de viruta suelen obtenerse buenos acabados superficiales, pero no son convenientes en procesos automatizados, ya que pueden bloquear el movimiento de la herramienta. Este problema puede resolverse con el uso de **rompevirutas**.

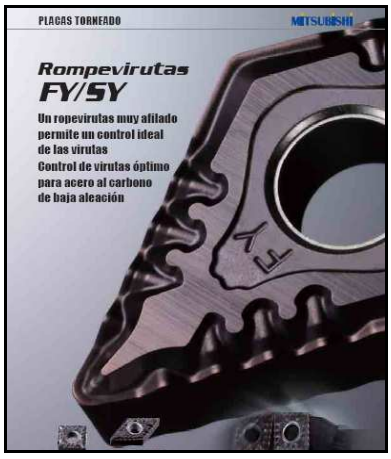



**Figura 29. Rompevirutas Mitsubishi.**

En materiales dúctiles, trabajados a velocidades intermedias, puede aparecer el denominado **Filo de Recrecido o Aportado**. El material de la pieza se adhiere a la herramienta, actuando como prolongación del filo de corte. Se obtiene una viruta menos discontinua, pero con ondulaciones en la cara mecanizada de la pieza de trabajo. Se debe evitar, pues también va a afectar a la vida útil de la herramienta y a las fuerzas de mecanizado. Para reducir la aparición del Filo de Recrecido se puede:

- Aumentar la velocidad de corte.
- Disminuir la profundidad de corte.
- Aumentar el ángulo de ataque o desprendimiento.
- Uso de herramientas bien afiladas.
- Uso de fluidos de corte adecuados.
- Uso de herramientas con menos “afinidad química” con el material de la pieza de trabajo.

**Corte oblicuo.**

La mayoría de las operaciones de mecanizado se realizan con herramientas tridimensionales cuyo corte es oblicuo, de manera que los parámetros analizados para el corte ortogonal se complican. Quizás una diferencia muy importante sea la formación de la viruta, mientras que en el corte ortogonal la viruta se desplaza directamente sobre la cara de desprendimiento, en el corte oblicuo la viruta es helicoidal, dependiendo su forma del ángulo de inclinación de la herramienta (*i*).

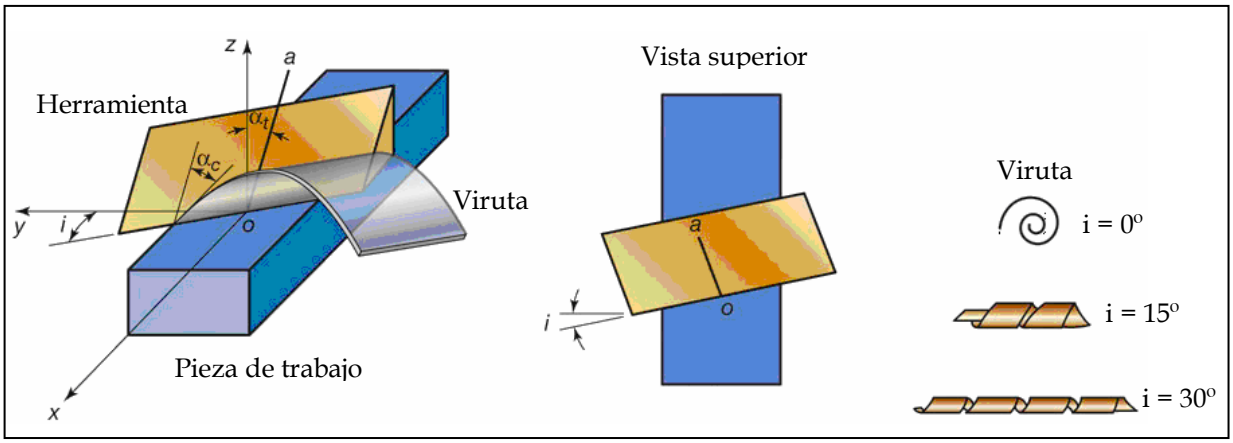



**Figura 30. Esquema de un corte ortogonal. (Fuente [1])**

**Fuerzas y Potencia de corte.**

Conocer las fuerzas y la potencia de corte es fundamental para poder realizar un diseño adecuado de las máquinas-herramienta que permita obtener una precisión dimensional correcta, así como elegir los portaherramientas y los dispositivos de sujeción de la pieza. También es necesario conocer esos dos parámetros para comprobar que la pieza de trabajo sea capaz de soportar las condiciones de trabajo y seleccionar una máquina con la potencia eléctrica adecuada.

En un corte ortogonal intervienen:

- Fuerza de corte $F_c$ (en la dirección de la velocidad de corte).
- Fuerza de empuje $F_t$ (en la dirección perpendicular a la fuerza de corte). Estas dos fuerzas producen la fuerza resultante $R$. Es importante conocer la fuerza de empuje pues es la que deberá soportar el porta-herramientas y demás componentes de fijación de la máquina.
- Esta fuerza resultante $R$ se puede descomponer en dos fuerzas sobre la cara de desprendimiento de la herramienta: una fuerza de fricción $F$ a lo largo de la interfaz herramienta-viruta y una fuerza normal $N$ perpendicular a esta. Se puede demostrar que:

$$F = R\,sen\beta \quad y \quad N = R\cos\beta$$

siendo $\beta$ el ángulo de fricción y está relacionado con el coeficiente de fricción $\mu$ (en la interfaz herramienta-viruta $\mu = \tan\beta$).

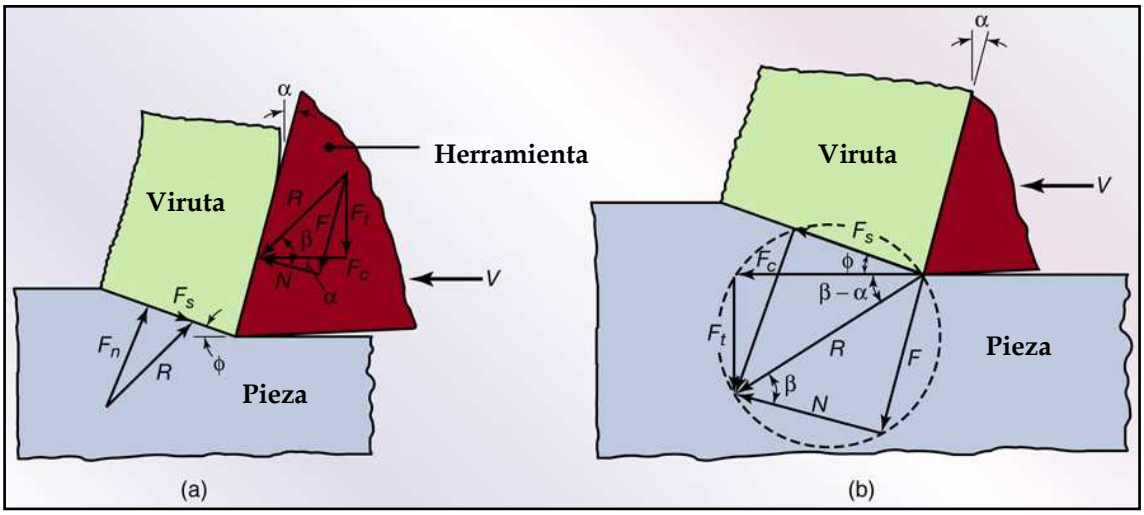



**Figura 31. Fuerzas en un corte ortogonal (a). Círculo de fuerzas (b).** **(Fuente [1])**

La fuerza resultante $R$ está equilibrada por una fuerza a lo largo del plano de cizallamiento y se resuelve como la suma de una fuerza de cizallamiento $F_s$ y una fuerza normal $F_n$. Se puede demostrar que:

$$F_s = F_c\cos\phi - F_t\,sen\phi$$

$$F_n = F_c\,sen\phi + F_t\cos\phi$$

Conociendo el ángulo de cizallamiento y la profundidad de corte se obtiene el área de cizallamiento y por tanto los esfuerzos de cizallamiento y normal a dicho plano.

El coeficiente de fricción ($\mu$) se define como:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{F_t + F_c\tan\alpha}{F_c - F_t\tan\alpha}$$

**Potencia de corte**: se puede calcular como la fuerza de corte por la velocidad de corte. También se pueden obtener la potencia en la zona de cizallamiento (debido a la energía requerida para cizallar el material) y la potencia en la cara de ataque (debida a la fricción entre la viruta y la herramienta).

La determinación de las fuerzas y potencias que tienen lugar en los procesos de mecanizado se basa principalmente en la toma de datos experimentales (debido a la multitud de factores que intervienen en el proceso). Algunos datos de referencia (Fuente [1]):

| **Material** | **Energía específica** | |
|---|---|---|
| | **W s mm$^{-3}$** | **Hp min pulg$^{-3}$** |
| Aleaciones de aluminio | 0.4 – 1 | 0.15 – 0.4 |
| Fundiciones | 1.1 – 5.4 | 0.4 – 2 |
| Aleaciones de cobre | 1.4 – 3.2 | 0.5 – 1.2 |
| Aleaciones de magnesio | 0.3 – 0.6 | 0.1 – 0.2 |
| Aleaciones de níquel | 4.8 – 6.7 | 1.8 – 2.5 |
| Aleaciones refractarias | 3 – 9 | 1.1 – 3.5 |
| Aceros inoxidables | 2 – 5 | 0.8 – 1.9 |
| Aceros | 2 – 9 | 0.7 – 3.4 |
| Aleaciones de titanio | 2 – 5 | 0.7 - 2 |

**Energía específica**: energía necesaria para remover una unidad de volumen de material.

**Desgaste de la herramienta**

La duración de la herramienta es un factor clave desde el punto de vista económico. La pérdida en la capacidad de corte puede producirse de dos maneras:

- Progresivamente, por desgaste. Tres mecanismos:

    - **Desgaste por adhesión**: se produce al romperse las microsoldaduras existentes entre el material de la viruta y el de la herramienta, en la cara de desprendimiento. Al fracturarse estas microsoldaduras se desprenden pequeños fragmentos del material de la herramienta. Si existe rozamiento entre la cara de incidencia y la superficie mecanizada de la herramienta, se produce este desgaste, pasando fragmentos de material de la herramienta a la cara mecanizada.
    - **Desgaste por abrasión**: partículas endurecidas de la viruta deslizan por la cara de desprendimiento de la herramienta, eliminando pequeñas cantidades de material de la herramienta.
    - **Desgaste por difusión**: átomos de una red cristalina de una región de alta concentración, se desplazan, siempre a altas temperaturas, a otra región de concentración atómica menor.

- Instantáneamente, por desmoronamiento o fallo catastrófico: rápido deterioro de la arista de corte después de un periodo de corte bien ejecutado. Suele deberse a la combinación entre elevados esfuerzos de corte y elevadas temperaturas (importancia de la lubricación y refrigeración). No debe confundirse con la rotura prematura de la herramienta debido a algún defecto de ésta o por causas externas.

Zonas de Desgaste:

- **Desgaste en incidencia**: ocasionado por el rozamiento entre la superficie mecanizada y la cara de incidencia de la herramienta. Se genera una franja de desgaste.
- **Desgaste en desprendimiento**: en la zona de contacto de la viruta y la cara de desprendimiento de la herramienta. Suele ajustarse a la forma de la viruta, forma el denominado cráter.

**Maquinabilidad**

La mayoría de los metales y sus aleaciones pueden conformarse por arranque de viruta, sin embargo en algunas ocasiones es necesario aplicarle a estos un tratamiento térmico previo, debido a que no todos los materiales se dejan trabajar con igual facilidad, o sea que no tienen la misma maquinabilidad.

La maquinabilidad se define como la aptitud de los materiales para ser conformados por mecanizado mediante arranque de material o viruta.

Se evalúa mediante la realización de una serie de ensayos en los que se determina las siguientes características:

- La duración del afilado de la herramienta.
- La velocidad de corte para una determinada duración de la herramienta.
- La fuerza de corte en la herramienta / potencia.
- El trabajo de corte.
- La temperatura de corte.
- La producción de viruta.
- Acabado superficial.

Experimentalmente se ha comprobado, para acero, que la maquinabilidad depende de los siguientes factores:

- Composición química del material.
- Tipo de microestructura (constitución).
- Inclusiones que contengan (partículas de ≠ material dentro de la estructura).
- Dureza y resistencia (materiales blandos se mecanizan a mayor velocidad).
- Ductilidad y acritud (los materiales se mecanizan mejor cuanto más elevada sea la relación: Límite elasticidad/Resistencia Mecánica).
- Tamaño del grano (el aumento del tamaño del grano facilita el mecanizado).
- Conductividad térmica.
- Presencia de aditivos libres.

Ej. Aceros: gran variedad de maquinabilidad, disminuyendo con forme aumenta el porcentaje de carbono (aumenta la dureza, y el filo de la herramienta dura menos).

## 3.3 Materiales para herramientas de corte y fluidos de corte (Fuente [1])

En este apartado se va a realizar un breve repaso sobre los principales materiales que se utilizan como herramientas de corte y fluidos de corte (lubricantes/refrigerantes).

### MATERIALES PARA HERRAMIENTAS DE CORTE

**Aceros de alta velocidad (HSS):** se llaman así porque fueron desarrolladas para su uso en máquinas capaces de trabajar a mayores velocidades de lo que era posible a principios del siglo XX. Son los aceros que tienen mayor aleación que el resto de aceros para herramientas. Gracias a su tenacidad (alta resistencia a la fractura) son adecuadas para:

- Herramientas con ángulos grandes y positivos de desprendimiento o de ataque (ángulo herramienta pequeño).
- Cortes interrumpidos.
- Máquinas con baja rigidez – trabajos con vibraciones.
- Herramientas complejas de una sola pieza (brocas, machos de roscar…)

Existen principalmente dos tipos de herramientas: al molibdeno (serie M, hasta el 10% de Mo) y al tungsteno o wolframio (serie T, entre 12 y 18% de W).

**Aleaciones de cobalto fundido:** aparecieron en 1915, composición: 38-53% de Co; 30-33% de Cr; 10-20% de W. Presentan elevada dureza: muy resistentes al desgaste. No son tenaces, son sensibles a impactos. En la actualidad suelen utilizarse para operaciones de desbaste con velocidades y avances relativamente elevadas.

**Carburos:** las herramientas anteriores tienen limitaciones en trabajos en caliente (no pueden utilizarse a elevadas velocidades). Para solventar este inconveniente se utilizaron los carburos (año 1930). Quizás sean las herramientas más importantes, versátiles y con un coste razonable dadas sus características: elevada dureza en un amplio rango de temperaturas, alto módulo elástico, alta conductividad térmica y baja dilatación térmica. Los dos grupos más utilizados son:

- Carburos de tungsteno: compuestas por partículas de tungsteno aglutinadas en una matriz de cobalto (6-16%). Se fabrican mediante metalurgia de polvos (sinterizado). Se puede añadir carburo de titanio y/o carburo de niobio para darles propiedades especiales.
- Carburos de titanio: consiste en una matriz de níquel-molibdeno.
- Plaquitas: el cuerpo de la herramienta suele ser de acero de alta velocidad, pero el filo de corte consiste en una plaquita de carburo.
- Clasificación: gran variedad, difícil de clasificar. Según su uso se clasifican en P (para metales ferrosos con virutas largas - Azul), M (para metales ferrosos con virutas largas o cortas y metales no ferrosos - Amarillo) y K (para metales ferrosos con virutas cortas, metales no ferrosos y materiales no metálicos - Rojo) según normativa ISO.

**Herramientas con recubrimiento:** con la aparición continua de nuevos materiales para mecanizar con propiedades cada vez más exigentes surge el desarrollo de las herramientas recubiertas. Estos recubrimientos aportan a la herramienta: menor fricción, mayor adhesión, mayor resistencia al desgaste y al agrietamiento, disminuye el desgaste por difusión, mayor dureza en caliente y resistencia al impacto. También pueden incrementar por 10 la vida útil de la herramienta. Los recubrimientos deben cumplir:

- Alta dureza a elevadas temperaturas (resistencia al desgaste).
- Estabilidad química y neutralidad con respecto al material de la pieza de trabajo.
- Baja conductividad térmica (evita altas temperaturas en el cuerpo de la herramiemta).
- Compatibilidad con el material del cuerpo de la herramienta.
- Muy poca o ninguna porosidad.

Recubrimientos más usados: nitruro de titanio; carburo de titanio; cerámicos; diamante; múltiples; carbonitruro de titanio; nitrurio de aluminio titanio; carburo de cromo; nitruro de zirconio, nitruro de hafnio.

**Cerámicos a base de alúmina:** en 1950 los materiales que se utilizaban para las herramientas de mecanizado se basaban en el óxido de aluminio de alta pureza de grano fino (se prensan y se sinterizan en frío), a este producto se les conoce como **cerámicos blancos**. Se les puede añadir carburo de titanio y óxido de zirconio para mejorar la tenacidad y resistencia al impacto térmico. **Cermets:** partículas de material cerámico en una matriz metálica (materiales **cerámicos negros** o prensados en caliente). Lo normal es 70% de óxido de aluminio y 30% de carburo de titanio.

Las herramientas de este tipo suelen tener muy alta resistencia a la abrasión y muy alta dureza en caliente. Químicamente son más estables que los carburos y los aceros de alta velocidad, por lo que tienden menos a adherirse al material de la pieza y a formar filos de recrecido.

**Nitruro de boro cúbico (cBN):** después del diamante es el material más duro que existe.

**Cerámicos con base de nitruro de silicio (SiN):** consisten en nitruro de silicio con adiciones de óxido de alumnio, óxido de itrio y carburo de titanio. Presentan tenacidad, dureza en caliente y buena resistencia al impacto térmico.

**Diamante:** material más duro. Algunas propiedades de este tipo de herramientas: baja fricción; alta resistencia al desgaste; capacidad de mantener su filo de corte (desgaste). Se suele utilizar cuando se requiere un buen acabado superficial y precisión dimensional.

## FLUIDOS DE CORTE

Se utilizan para:

- Reducir fricción y desgaste.
- Enfriar la zona de corte.
- Reducir las fuerzas necesarias y el consumo de energía.
- Retirar la viruta de la zona de corte.
- Proteger la superficie ya mecanizada de la corrosión ambiental.

Los fluidos de corte pueden ser refrigerantes, lubricantes o ambos. El agua es un excelente refrigerante, pero no lubrica y provoca la oxidación. Tipos de fluidos.

- **Aceites (aceites simples)**: aceites minerales, animales, vegetales, compuestos y sintéticos. Se suelen utilizar para trabajos a baja velocidad con temperaturas bajas.
- **Emulsiones (aceites solubles)**: mezcla de aceite, agua y aditivos. Se utilizan en operaciones de alta velocidad y elevadas temperatura (la presencia de agua hace que sean mejores refrigerantes).
- **Semisintéticos**: emulsiones químicas (aceite mineral diluido en agua y aditivos).
- **Sintéticos**: productos químicos con aditivos, diluido en agua y sin aceite.

## 3.4 Control Numérico

El **Control Numérico** (**CN**) es un método basado en el control de los movimientos de las máquinas-herramienta mediante el uso de órdenes o instrucciones codificadas en líneas de números y letras. Estas líneas de código numéricas son leídas e interpretadas por la máquina dando como resultado diferentes señales de salida. Estas señales de salida se dirigen a los diferentes componentes de la máquina para llevar a cabo la función u operación indicada (movimientos de la pieza de trabajo, movimientos de la herramienta, activación/desactivación del fluido de corte, cambio de herramienta…).

Al principio las instrucciones se proporcionaban a las máquinas con control numérico mediante el uso de tarjetas o cintas perforadas, del mismo modo que se hacía en los ordenadores antiguos. Con el desarrollo de la tecnología, las máquinas-herramienta incorporaron sus propios ordenadores, a lo que se le denomina **Control Numérico Computarizado** (**CNC**).

Por último podemos hablar del **Control Numérico Adaptativo (CNA):** se van analizando ciertas variables durante los trabajos de mecanizado y el control numérico puede ir variando los parámetros de corte según las condiciones que se estén dando. Se utilizan sensores de fuerza, de deformación de la herramienta, de temperatura…

Las ventajas del mecanizado CN o CNC frente al mecanizado tradicional parecen claras, podemos mencionar algunas:

- Permite realizar formas mucho más complejas; aumenta la flexibilidad de la máquina en cuanto a la complejidad y variedad de trabajos distintos que se pueden realizar.
- Aumenta la precisión dimensional.
- Se pueden repetir los trabajos fácilmente.
- Reduce la pérdida de material.
- Permite mayores velocidades de trabajo.
- Aumenta la calidad de las piezas y la productividad.
- Reduce el coste de material (no es necesario el uso de plantillas).
- Se facilita el ajuste de la máquina.
- Se reducen los tiempos muertos (cambios de herramienta, inicio de nuevos trabajos…).
- La programación de piezas complejas es relativamente rápida. Los programas se almacenan en bases de datos y se pueden reutilizar.
- Permite la producción de prototipos con rapidez.
- Se requiere menor cualificación del operador de la máquina (aunque requiere de un programador).

Principales inconvenientes → el coste inicial, necesidad de un programador, equipos informáticos y el mantenimiento requerido.

Podemos diferenciar dos tipos de control numérico por ordenador:

- **Control Numérico Directo (DNC)**: varias máquinas se controlan con un ordenador central. **Control Numérico Distribuido (DNC*)**: es una versión más reciente del anterior; una computadora central controla varias máquinas, pero a su vez cada máquina incorpora su propio ordenador (aumenta la flexibilidad) y no tiene el inconveniente de depender de un único ordenador central.
- **Control Numérico por Computadora (CNC)**: el ordenador de control es parte integral de la máquina. El operador puede realizar nuevos programas, modificar programas antiguos y almacenarlos directamente en la máquina (en el ordenador integrado).

En los procesos de mecanizado por control numérico podemos considerar tres elementos fundamentales: la propia máquina, el control numérico y la información necesaria (el programa de instrucciones):

- **Entrada de datos**: la información contenida en el código numérico del programa se lee y se almacena en la memoria del ordenador.
- **Procesamiento de los datos**: la unidad de control de la máquina interpreta o procesa los programas.
- **Salida de datos**: la información contenida en el código numérico, una vez interpretada, da lugar a una serie de salidas o comandos dirigidos normalmente al servocontrol (lo que dará lugar a movimientos de la mesa de trabajo, de la herramienta…). Los actuadotes pueden ser: motores de corriente continua; motores asíncronos o de inducción; motores paso a paso; motores síncronos de imanes permanentes; accionamientos neumáticos; accionamientos hidráulicos.

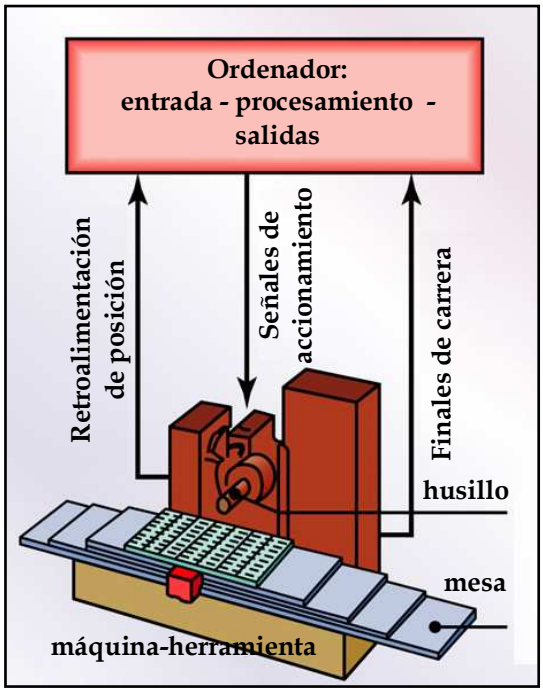



**Figura 32. Esquema de los principales componentes de control de posición de una máquina-herramienta CNC. (Fuente [1])**

**Circuitos de control**: podemos encontrar circuitos de control de **lazo abierto** (Fig. 33 superior) o de **lazo cerrado** (Fig. 33 inferior). En los **abiertos** las señales se envían a los servocontroles pero los movimientos y posiciones finales no se verifican. En los **cerrados** se cuenta con sensores de posición, de modo que cuando se manda una señal al servocontrol y este acciona algún componente, por ejemplo la mesa de trabajo, existe una retroalimentación de la posición final alcanzada por la mesa de trabajo; el controlador comprueba si la mesa está en la posición correcta y en caso contrario realiza las correcciones oportunas.

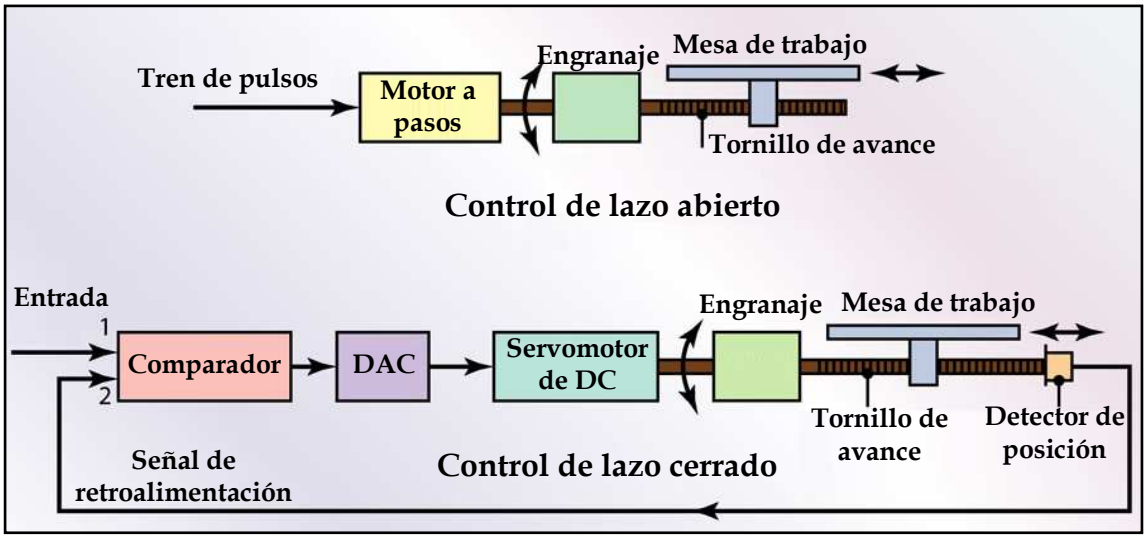



**Figura 33. Componentes de los sistemas de control de lazo abierto (superior) y de lazo cerrado (inferior). DAC: convertidor digital-analógico. (Fuente [1])**

Métodos de **medida de la posición (posicionamiento)** en máquinas CNC (Fig. 35):

- **Indirectos**: se basan principalmente en principios magnéticos y fotoeléctricos.
    - **Codificadores (encoders)**: constan de un disco transparente con unas marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí. Un sistema de forreceptores detecta el paso por cada marca y genera una señal de pulsos; contabilizando los pulsos es posible conocer la posición del eje (Fig. 34). Pueden ser absolutos o incrementales.
    - **Rotatorios o reductores (resolvers)**: se basan en una bobina giratoria solidaria a un eje (excitada por una portadora) y dos bobinas fijas situadas a su alrededor. El giro de la bobina móvil hace que el acoplamiento con las bobinas fijas varíe; siendo la señal resultante función del ángulo de giro.

- **Directos**: reglas graduadas (generalmente con lectores ópticos). Más preciso. Se basa en una regla de vidrio graduada con marcas opacas y un lector óptico que detecta las diferentes marcas en la regla. Suelen ser sistemas incrementales, siendo necesario buscar la señal de referencia (marca 0) antes de comenzar a trabajar (por ejemplo, cada vez que se enciende o reinicia la máquina).

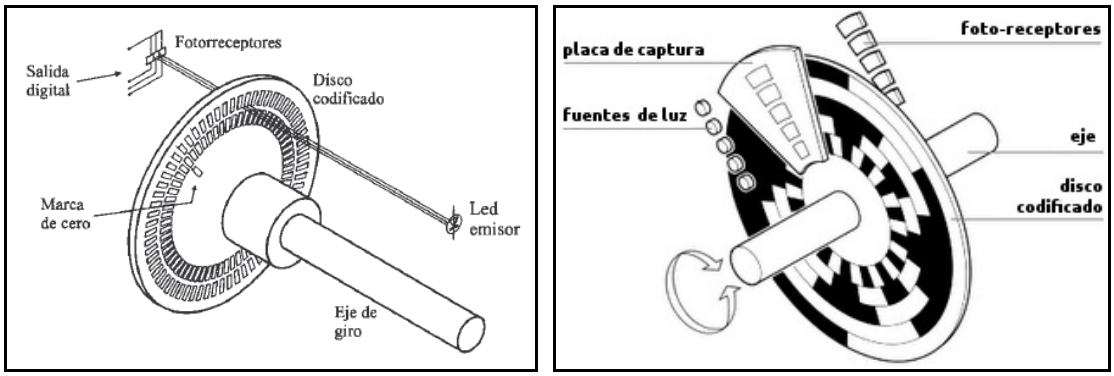



**Figura 34. Codificador óptico (encoder) incremental (izq.) (Fuente [3]) y absoluto (dcha.)**

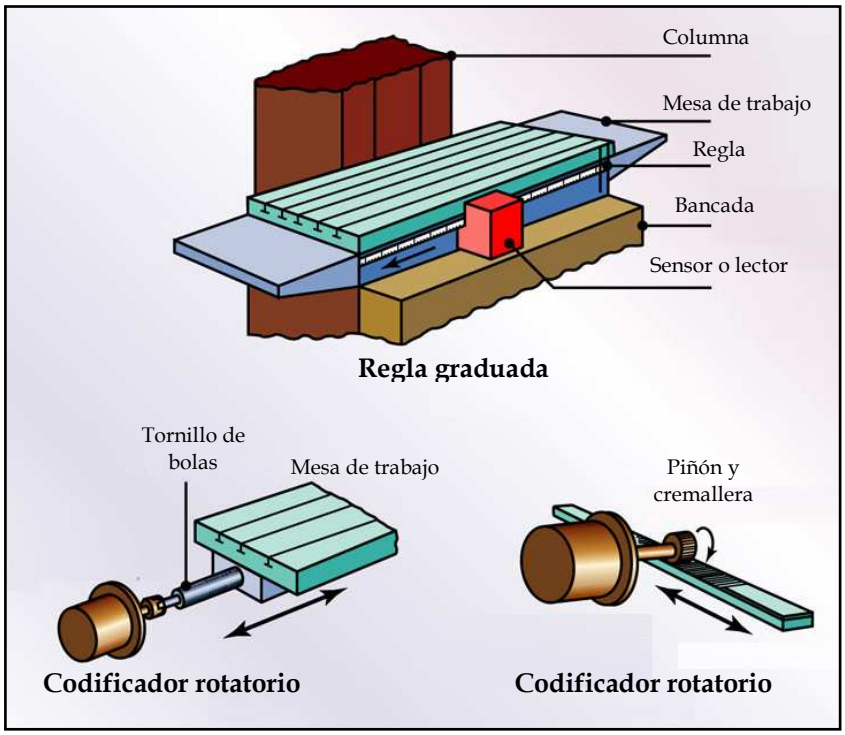



**Figura 35. Sistemas de medida directos e indirectos. (Fuente [1])**

En el control numérico existen tres tipos básicos de control:

- **Sistema Punto a Punto (o de posicionamiento)**: cada eje de la máquina se acciona por separado con tornillos de avance y a diferentes velocidades dependiendo de la operación. Al principio la máquina se mueve a máxima velocidad (movimiento de aproximación) y luego desacelera cuando se aproxima a la superficie de trabajo (optimizar tiempos), y continúa la trayectoria en secuencia para realizar la operación. Una vez realizada la operación la herramienta se retira y se dirige a la siguiente posición donde se repite la operación. Típico en taladradazo, punzonado y fresado.
- **Sistema paraxial**: permite controlar la posición y trayectoria del elemento móvil siempre en sentido paralelo a los ejes de la máquina (en algunos casos a 45º también).
- **Sistema de Contorneado (o de trayectoria continua)**: tanto los movimientos de aproximación, posicionamiento y las operaciones de mecanizado se realizan siguiendo diferentes trayectorias y a diferentes velocidades. Se requiere una sincronización precisa de la velocidad y los movimientos a lo largo de las trayectorias. Típico en tornos, fresadoras, rectificadoras, soldadoras y centros de mecanizado.

- **Interpolación**: el movimiento a lo largo de una trayectoria se realiza interpolando entre puntos, métodos:
  - **Interpolación lineal**: la herramienta se mueve en línea recta de un punto a otro. Con este método se pueden realizar todo tipo de perfiles, pero si son muy complejos requiere procesar una gran cantidad de información.
  - **Interpolación circular**: se requiere las coordenadas del punto final, las coordenadas del centro del arco que queremos que describa, el radio y el sentido (horario/antihorario).
  - **Interpolación parabólica o cúbica**: las trayectorias se aproximan utilizando curvas con ecuaciones matemáticas de orden superior. Éste método, de mayor complejidad, se utiliza en máquinas con cinco o más ejes (o en robots industriales).

**Programación en Control Numérico:** en la programación introduciremos todos los datos necesarios para realizar el mecanizado. El programa es una lista secuencial de instrucciones en un lenguaje numérico (alfa-numérico).

Se parte del plano de la geometría de la pieza que queramos mecanizar (con toda la información del mecanizado: acabado, tolerancias…), el operario debe estudiar el plano y decidir que operaciones hay que realizar, el orden, el tipo de herramientas a utilizar… y a partir de ahí realizar el programa. La información que se debe introducir en el programa es de tres tipos:

- **Geométrica:** dimensiones de la pieza, acabado superficial, tolerancias, dimensiones de las herramientas…
- **Tecnológica:** velocidad de avance, velocidad de corte, materiales de la pieza y de las herramientas, tipos de refrigeración, número de pasadas, orden, modo de funcionamiento del mecanizado, características de las herramientas…
- **De programación:** principios del programa, bucles, funciones principales y auxiliares…

**Modos de programación:**

- **1. Programación Manual:** el programador u operario a partir de los planos edita el código de programación de la máquina (debe determinar las trayectorias, condiciones de trabajo…).
- **2. Programación pseudo-asistida por ordenador:** a partir del diseño gráfico de la pieza de trabajo en programas CAD se obtienen las trayectorias. Luego el usuario debe editar el código numérico de forma manual
- **3. Programación asistida por ordenador (CAD-CAM):** a partir del diseño gráfico de la pieza de trabajo en programas CAD y a partir de la información tecnológica proporcionada con el programa CAM se obtiene directamente el código numérico. Permite mecanizar geometrías más complejas de forma más sencilla.
- **4. Programación Conversacional:** la programación del mecanizado se realiza directamente sobre el panel de control de la máquina siguiendo los menús cerrados de ésta. Permite realizar la programación de forma interactiva, guiada por menús y con visualización gráfica, permitiendo la verificación continua del programa No requiere un conocimiento profundo del código numérico.

**Fases de programación**

- **1. Preparación del trabajo:** con toda la información necesaria para el mecanizado se debe realizar una secuencia de operaciones u **hoja de procesos** con:
  - Orden cronológico de las etapas y operaciones.
  - Características tecnológicas de cada etapa: velocidades de corte, avances, profundidad de pasada, uso o no de refrigerante…
  - Herramientas y utillaje en cada etapa.
  - Amarres y sujeción.
- **2. Elaboración del programa CN:** con las trayectorias, condiciones de trabajo…
- **3. Puesta a punto del programa**: depuración y simulación (comprobar que no haya errores, colisiones de la herramienta y/o pieza de trabajo). Se puede realizar en la propia máquina en vacío (siempre) y también utilizando programas de simulación (opcional).

| | HOJA DE PROCESO | | | Nº de piezas | Hoja nº | Nº de hojas | Croquis |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 1 | |
| Conjunto: | Ejemplo 1 | | | Material: | | | |
| Plano: | | | | Dimens. en bruta: | Ø50 x 81 | | |
| Realizado: / Fecha: | | | | Comprobado: / Fecha: | | | |

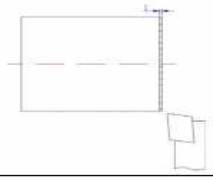
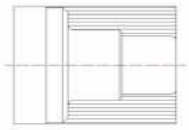
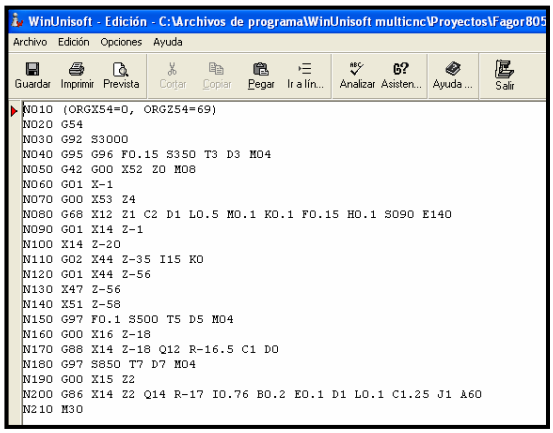
| Fase | Subfase | Operación | Esquema | Descripción | Máq | Útil | Control | Condiciones de corte Vc m/min | N rpm | a mm/n mm/min | P mm | Longitud mm | Tiempo (min) Preparación | Tiempo (min) Trabajo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 |  | Refrentado | Torno | T1 | Calibre | 160 | | 0.15 mm/n | 1 | 51,6 | | |
| | | 2 |  | Mecanizado de la forma | Torno | T1 | Calibre | 160 | | 0.15 mm/n | | | | |

**Figura 36. Hoja de proceso. (Fuente [1])**



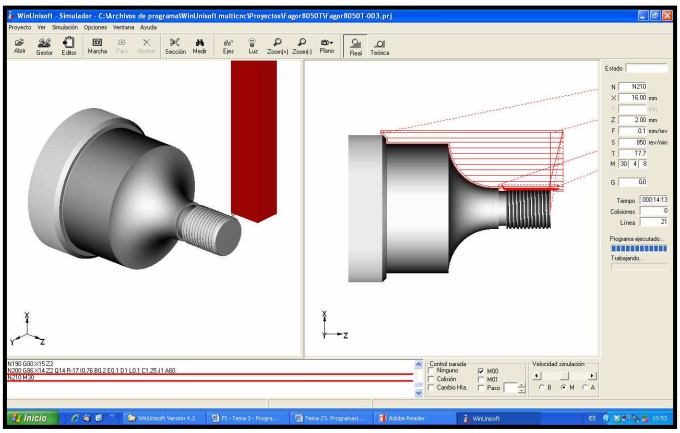



**Figura 37. Ejemplo de un programa en Código ISO (izq.).**

**Figura 38. Programa de simulación y programación WinUnisoft (dcha.).**

**Sistemas de cambio de herramientas y de piezas**

El cambio de herramientas puede ser manual o automático. En el caso de ser manual limita las posibilidades de automatización, si se desea cambiar de herramienta entre pasada y pasada será necesario programar un tiempo muerto o de reposo suficiente.

Para el cambio de herramientas automático se puede optar por "Torretas giratorias" o "Almacenes de herramienta (de tambor o cadena)". En torno se suele optar por torretas giratorias (hasta 12 herramientas). Los almacenes de herramientas suelen utilizarse para centros de mecanizado (máquinas que requieren de un elevado número de herramientas). Para máquinas CNC con opción de cambio automático de herramientas se han estableciendo comandos determinados para tal fin.

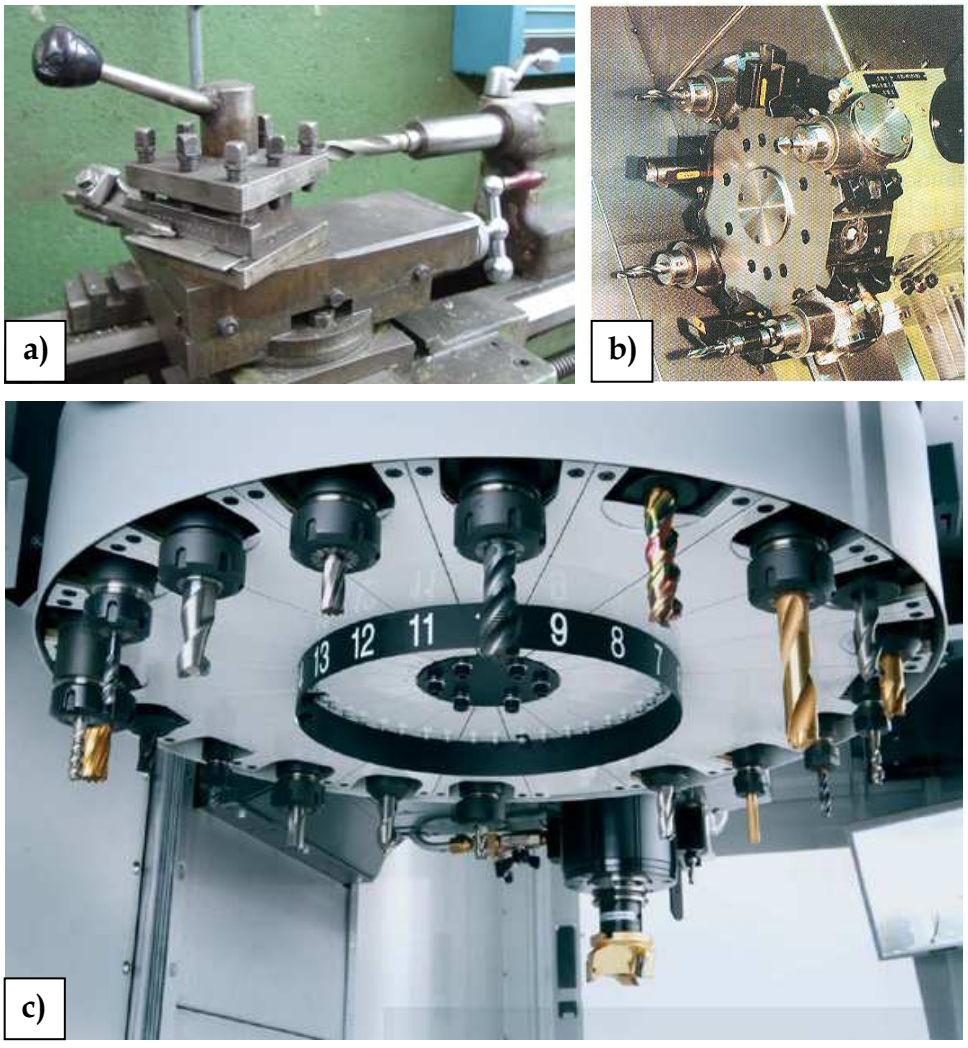



**Figura 39. Torreta porta-herramientas manual (a); Torreta giratoria automática (b). Tambor giratorio (c) (Fuente [2])**

## 3.5 El torno CNC

En este apartado nos vamos a centrar en la programación de tornos CNC utilizando el código numérico ISO. Hoy en día se suele recurrir a la programación asistida por ordenador mediante programas CAD-CAM o a la programación conversacional mediante el uso de los paneles de control de las máquinas herramienta que facilitan este tipo de tareas, sin necesidad de conocer en profundidad el código numérico ISO. A pesar de esto, consideramos fundamental conocer la base de la programación en código ISO.

### Operaciones en torno (repaso)

En la siguiente figura se presentan las principales operaciones básicas a tener en cuenta en operaciones en torno.

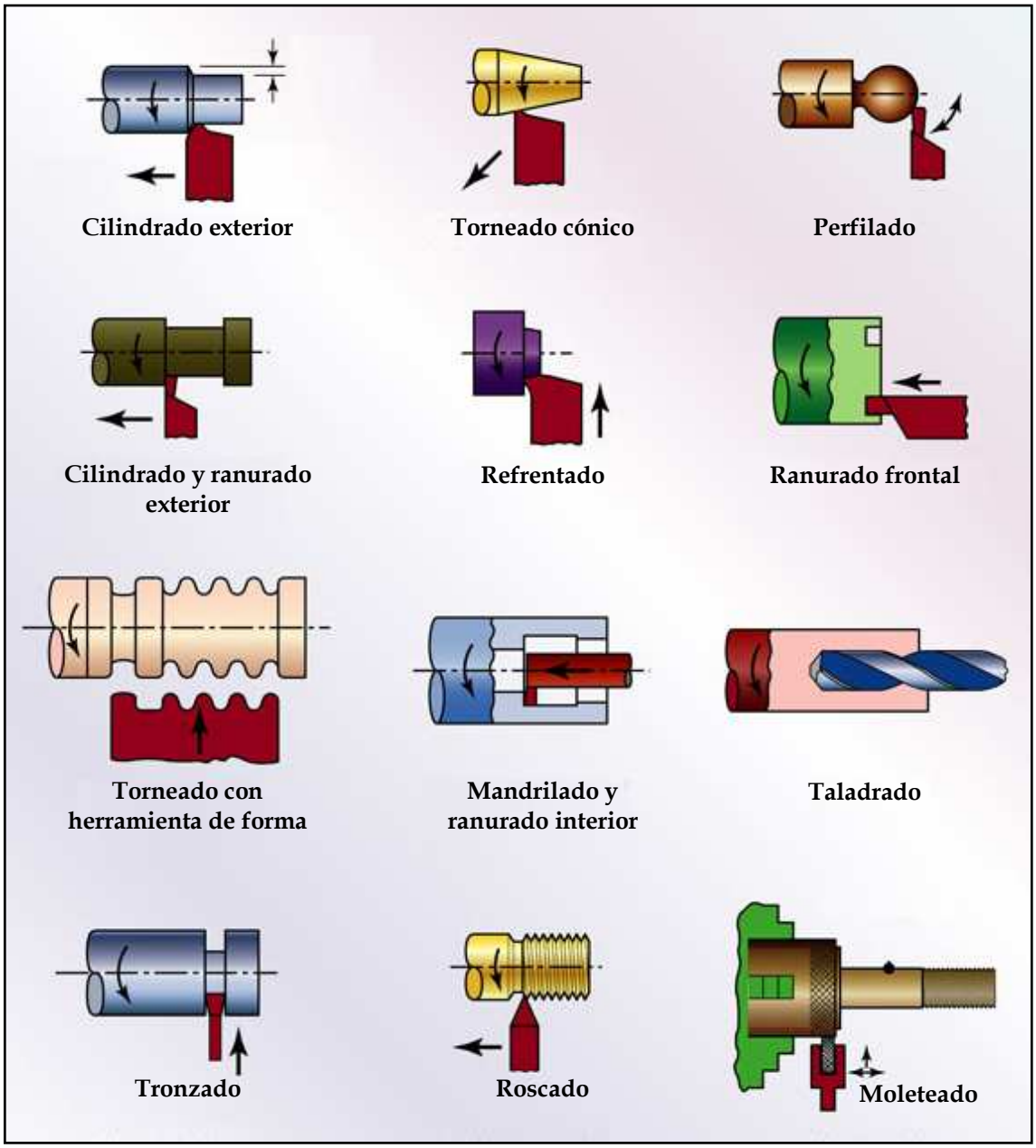



**Figura 40. Principales operaciones en torno [Fuente (1)].**

**Sistemas de referencia**

El **eje Z** suele referirse a la dirección del husillo principal (que aporta la potencia de corte); si no hay husillo principal el eje Z sería el perpendicular al plano de sujeción de la pieza (sentido positivo al alejarse de la pieza); en el caso del torno se denomina eje Z al eje del husillo que hace girar la pieza de trabajo.

El **eje X** será perpendicular al eje Z.

El **eje Y** no se considera en trabajos de torno.

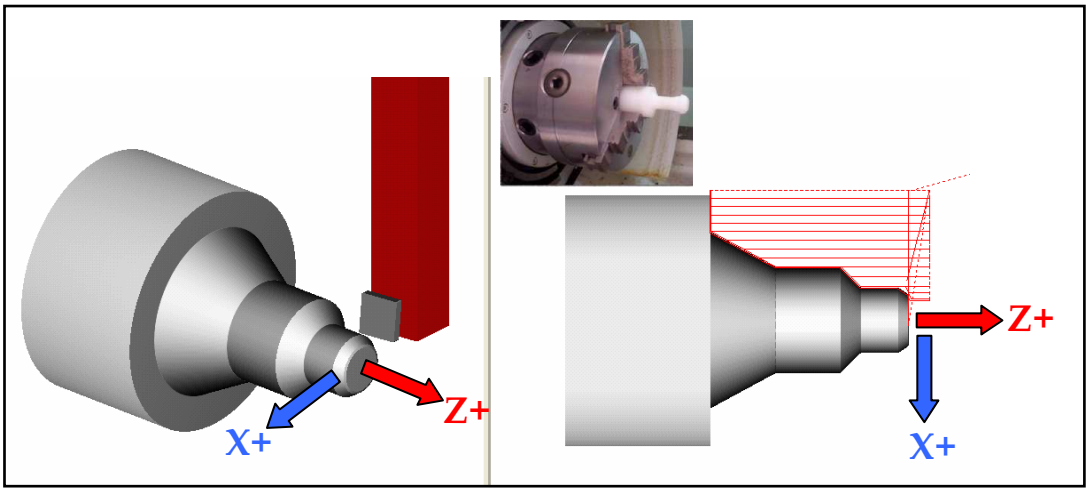



**Figura 41. Ejes en un torno paralelo. Vista isométrica (izq.), vista superior (dcha.).**

**Orígenes de referencia (Cero máquina – Cero pieza)**

- **Cero Máquina**: se puede considerar el punto de referencia para el resto de elementos móviles de la máquina, sería nuestro cero absoluto en el sistema de referencia. El cero máquina suele estar en algún punto inaccesible para la herramienta y depende de cada fabricante. En el caso del **torno**, el cero máquina suele situarse en el eje del husillo de giro de la pieza de trabajo, en alguna posición próxima a la zona de sujeción de la pieza.
- **Cero Pieza (Cero Programa)**: punto con respecto al cual se suelen referenciar las coordenadas de las trayectorias establecidas en el código numérico de los programas. El cero pieza debe ser seleccionado por el operario antes de ejecutar cualquier programa (en **torno**, generalmente se establece como cero pieza el centro de la cara frontal del bruto o pieza de trabajo). El procedimiento para establecer el cero pieza puede variar según el tipo de torno (modelo, fabricante).
- **Cero Herramienta**: punto a partir del cual se tendrán en cuenta o se establecerán las dimensiones de la herramienta introducidas por el usuario. En torno, suele estar localizado en la base de sujeción común de las herramientas (carro portaherramientas).
- **Otros puntos de interés**:
    - **Home**: es común definir en tornos con control numérico una posición de reposo para la herramienta. Suele ser un punto alejado de la pieza de trabajo donde reposa la herramienta antes de ejecutar un programa y hacia donde se retira una vez finalizado el trabajo.

- **Límites de seguridad**: se pueden establecer límites (X+, X-, Z+, Z-) que no puede sobrepasar la herramienta. Estos límites evitan que por erratas en el código numérico la herramienta pueda chocar con partes de la máquina.

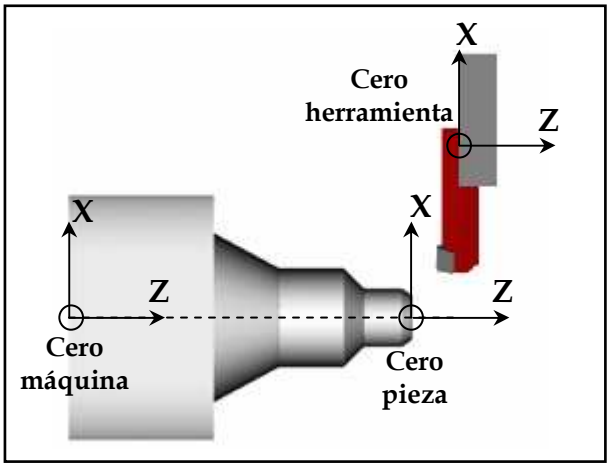



**Figura 42. Orígenes de referencia en torno paralelo.**

### Compensación del radio de la herramienta de corte

Si las trayectorias programadas en código numérico se refieren a la punta de la herramienta, éstas deberán ser compensadas en función del radio real de la herramienta. En torneado, la trayectoria programada se refiere a la punta teórica del filo de corte (**punto P**); las herramientas de torno suelen tener el filo de corte con cierto radio de redondeo, de modo que la punta de la herramienta que realizará el mecanizado se encontrará entre los **puntos A y B**. Para compensar esta diferencia es necesario introducir en el torno las dimensiones de la punta de la herramienta y activar el comando de compensación. Esta compensación no será necesaria en el caso de trayectorias paralelas a los ejes Z (refrentado) o X (cilindrado).

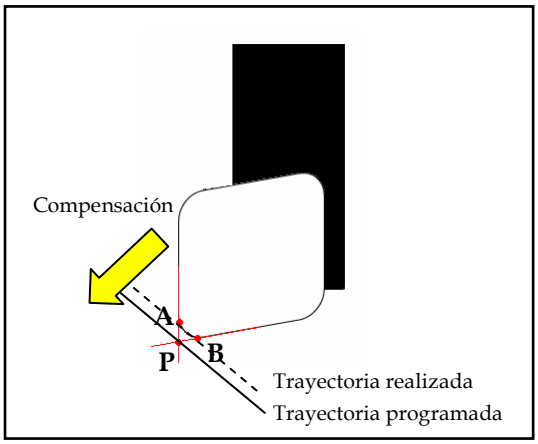
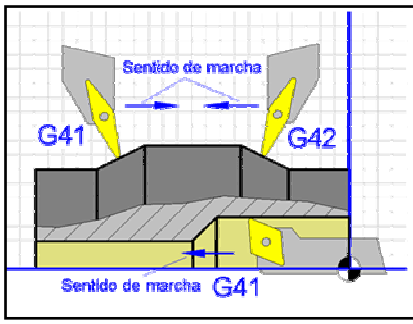



**Figura 43. Compensación del radio de herramienta en torno.**

Para activar la compensación de la herramienta existen funciones específicas dentro del código numérico. Será necesario indicar si la compensación se debe realizar a izquierdas o a derechas (depende de la posición relativa de la herramienta con la pieza, especificando si la herramienta se encuentra a la izquierda o a la derecha de la superficie de la pieza, según el sentido de avance de la herramienta).




Posición relativa de la herramienta a la pieza según el sentido de avance:
G41 a izquierdas
G42 a derechas

**Figura 44. Compensación a izquierdas o a derechas.**

Otra opción es realizar la programación de las trayectorias referidas al cero pieza, en este caso antes de ejecutar el programa será necesario establecer el cero colocando la punta de la herramienta en dicho cero pieza y fijarlo en la máquina a través del panel de control.

### Código Numérico (Código ISO)

El código numérico de un programa de mecanizado en torno se organiza en bloques o líneas de código (cada bloque suele corresponder a una línea de código). Dentro de cada bloque nos encontramos con una serie de funciones (expresadas por números y letras) que pueden controlar las trayectorias de la herramienta, el cambio de herramientas, fijar parámetros de corte…

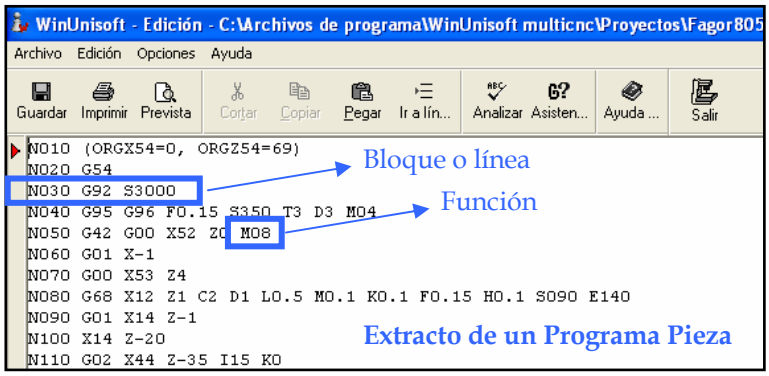



**Figura 45. Ejemplo de la estructura de un programa en Código ISO.**

En la siguiente tabla se muestra el significado de las principales funciones expresadas por letras:

**Tabla 1. Funciones en Código ISO**

| Función | Significado |
|---|---|
| **A** | Coordenada angular alrededor del eje X (Z en torno) |
| **B** | Coordenada angular alrededor del eje Y |
| **C** | Coordenada angular alrededor del eje Z |
| **D** | Coordenada angular alrededor de un eje especial o tercera velocidad de avance |
| **E** | Coordenada angular alrededor de un eje especial o segunda velocidad de avance |
| **F** | Velocidad de avance |
| **G** | Función preparatoria |
| **D** | Disponible |
| **I** | Coordenada X respecto al centro de una circunferencia |
| **J** | Coordenada Y respecto al centro de una circunferencia |
| **K** | Coordenada Z respecto al centro de una circunferencia |
| **M** | Función auxiliar |
| **N** | Número de bloque |
| **O** | No utilizar |
| **P** | Movimiento terciario paralelo al eje X |
| **Q** | Movimiento terciario paralelo al eje Y |
| **R** | Movimiento terciario paralelo al eje Z o desplazamiento rápido según Z; radio en coordenadas polares |
| **S** | Velocidad de rotación |
| **T** | Función herramienta |
| **U** | Movimiento relativo en el eje X o secundario paralelo a este eje |
| **V** | Movimiento relativo en el eje Y o secundario paralelo a este eje |
| **W** | Movimiento relativo en el eje Z o secundario paralelo a este eje |
| **X** | Movimiento principal del eje X |
| **Y** | Movimiento principal del eje Y |
| **Z** | Movimiento principal del eje Z |

**En rojo se marcan las más usadas en torno CNC.**

Debemos destacar las cuatro funciones principales en Código ISO:

- **Funciones preparatorias de movimientos (G)**: determinan la geometría y condiciones de trabajo.
- **Funciones para el control de la velocidad de avance (F) y de la velocidad de giro del husillo principal (S).**
- **Función de herramientas (T):** para seleccionar la herramienta y su corrección.
- **Funciones auxiliares (M):** proporcionan información adicional sobre condiciones tecnológicas de trabajo (activación refrigerante, sentido de giro del husillo…).

A continuación se presenta un ejemplo de la estructura de un bloque o línea en Código ISO:

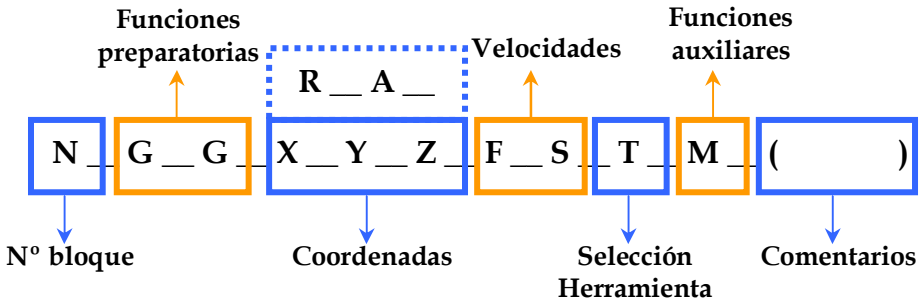



**Figura 46. Ejemplo de un bloque o línea de un programa en Código ISO.**

**Función modal**: cuando este tipo de funciones aparecen en un bloque o línea del programa siguen activas en los bloques sucesivos hasta que aparezca otra función del mismo tipo que la anule o sea incompatible con ella, o hasta que aparezca una instrucción de parada del programa o reset (por ejemplo la función T de selección de herramientas).

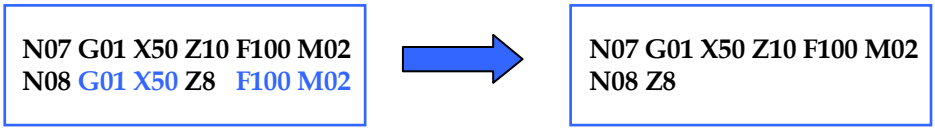



**Figura 47. Ejemplo de un bloque con funciones modales (en absolutas).**

### Programar cotas en Código ISO

Principalmente vamos a diferenciar entre la posibilidad de utilizar cotas **absolutas** o **incrementales**:

- **Cotas Absolutas**: las coordenadas que determinan los desplazamientos que debe seguir la herramienta se establecen respecto del origen pieza (origen del programa).
- **Cotas Incrementales**: las coordenadas que determinan los desplazamientos que debe seguir la herramienta se establecen respecto a la posición de la herramienta en cada momento (respecto del punto que le preceda al movimiento que vamos a realizar).

Por otro lado, el Código ISO permite programar las coordenadas de los desplazamientos en coordenadas cartesianas (X, Z para el torno) o coordenadas polares (R, radio; A, ángulo respecto el eje Z); también es posible realizarlo en coordenadas cilíndricas.

**Importante**: las coordenadas en el eje X para tornos CNC se indican en diámetros.

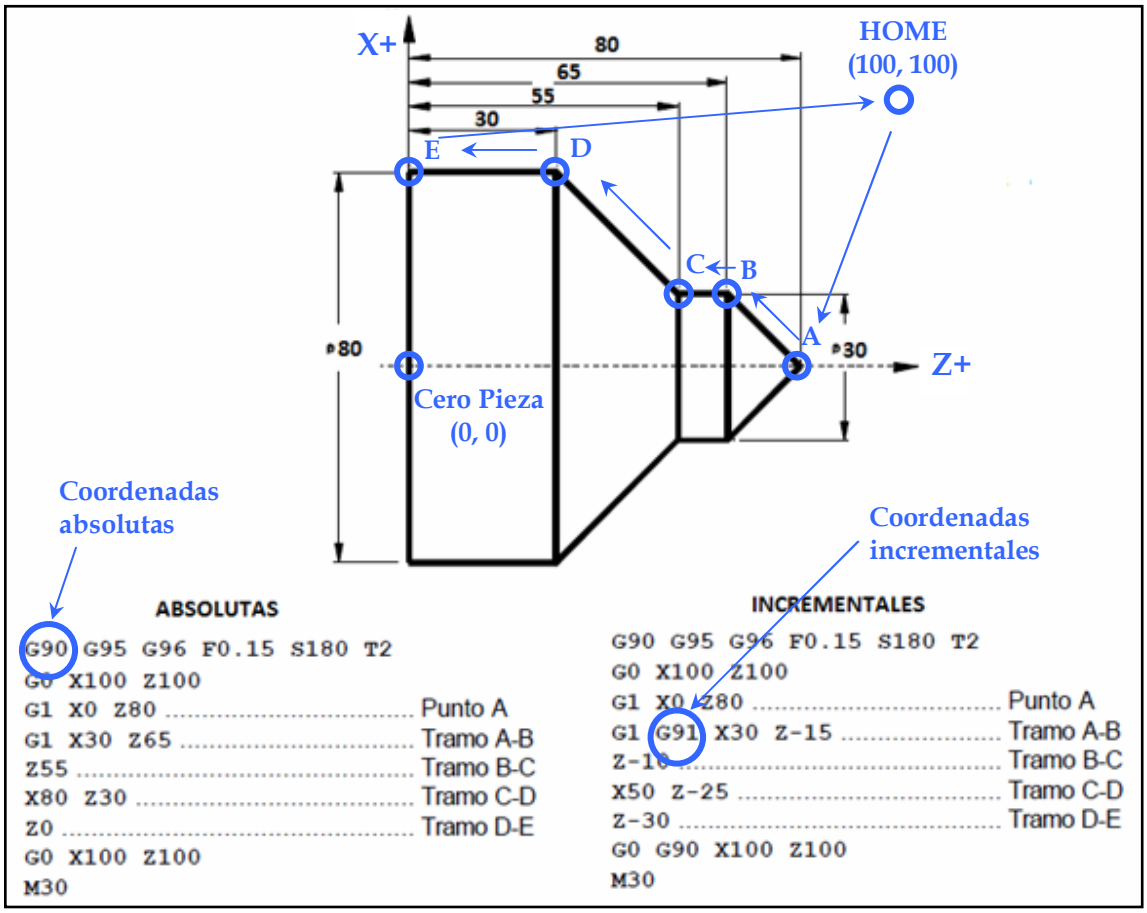



**Figura 48. Ejemplo de programación en coordenadas cartesianas absolutas o incrementales.**

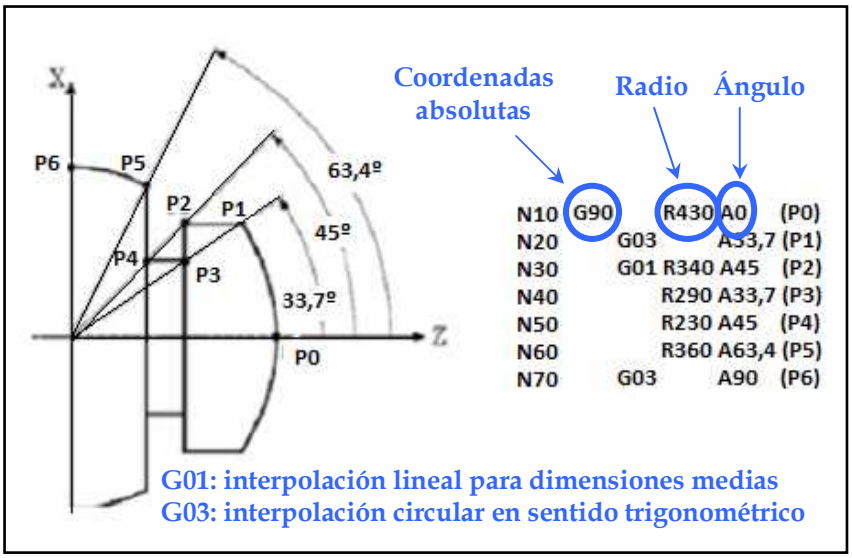



**Figura 49. Ejemplo de programación en coordenadas polares absolutas.**

**Fijar las velocidades de avance y giro**

**Comando F**: se utiliza para establecer la velocidad de avance. Se puede fijar en [mm $min^{-1}$] o en [mm $rev^{-1}$], para eso antes de introducir el comando F con la velocidad se debe indicar **G94** para [mm $min^{-1}$] o **G95** para [mm $rev^{-1}$]. Ambas son funciones modales. Ejemplo

**G94 F100** → (avance 100 mm $min^{-1}$)

**G95 F0.01** → (avance 0.01 mm $rev^{-1}$)

**Comando S**: se utiliza para establecer la velocidad de giro del cabezal. Se puede fijar en [m $min^{-1}$] o en [rpm], para eso antes de introducir el comando S con la velocidad se debe indicar **G96** para [m $min^{-1}$] o **G97** para [rpm]. Ambas son funciones modales. Ejemplo

**G96 S75** → (giro 75 m $min^{-1}$)

**G97 S1500** → (giro 1500 rpm)

A la hora de establecer la velocidad de giro se deberá tener especial cuidado en trabajos de refrentado u otros trabajo en los que el diámetro de la pieza disminuya en consideración. Si fijamos la velocidad de giro constante en rpm, a medida que disminuye el diámetro de la pieza disminuye la velocidad de corte, pudiendo superar el límite mínimo de velocidad de corte deseada. Para evitar esto, los tornos CNC permiten variar la velocidad de giro para mantener constante la velocidad de corte según vaya variando el diámetro de la pieza.

En caso de no disponer de esta opción, o de querer fijarlo de antemano en el código numérico, se puede realizar un **escalado de velocidades**, consiste en dividir la zona a mecanizar en varios tramos de giro constante [en rpm], de modo que siempre estemos dentro del intervalo de velocidades de corte admisibles; aumentando la velocidad de giro a medida que disminuye el diámetro de la pieza.

**Selección de herramientas**

En el caso de que el torno CNC disponga de una torreta giratorio porta-herramientas con cambio automático se utiliza la función **T** para seleccionar las distintas herramientas a utilizar en los diferentes bloques del programa.

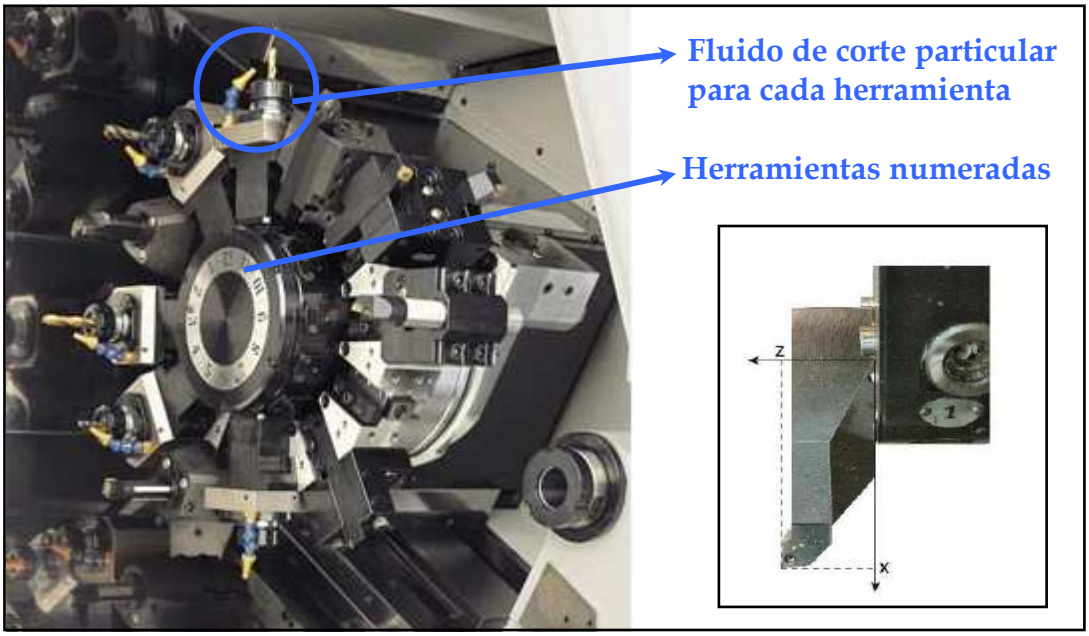



**Figura 50. Torreta porta-herramientas en torno CNC.**

Para seleccionar cada herramienta se utiliza la función **T**, seguida de un número que indica la posición de la herramienta, a continuación se escribe un punto y seguido de otro número que indica la corrección a realizar para dicha herramienta. La función M06 es la que efectúa el cambio de la herramienta (la función M06 no siempre es necesaria, depende del modelo de Torno).

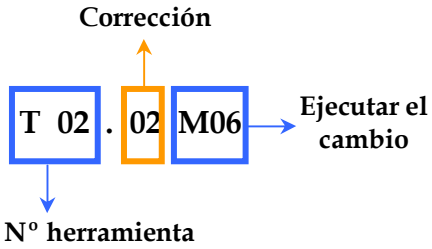



**Figura 51. Secuencia para el cambio de herramienta.**

Las correcciones a efectuar para cada herramienta deben introducirse en el panel de control del torno CNC, generalmente se introducen los siguientes datos: nº de corrección; compensación en el eje X, compensación en el eje Z (depende de la posición del filo de la herramienta respecto del Cero Herramienta); un código de forma, que indica la posición de la herramienta en el mecanizado; el radio de la punta de la herramienta, para las compensaciones en las trayectorias; y los desgastes de la herramienta en X y Z (las dimensiones reales de la herramienta se deben ir tomando cada cierto tiempo de mecanizado).

A veces para una misma herramienta se pueden utilizar diferentes correctores.

**Ojo en X se introducen las coordenadas en diámetros**

Algunos ejemplos de los códigos de forma:

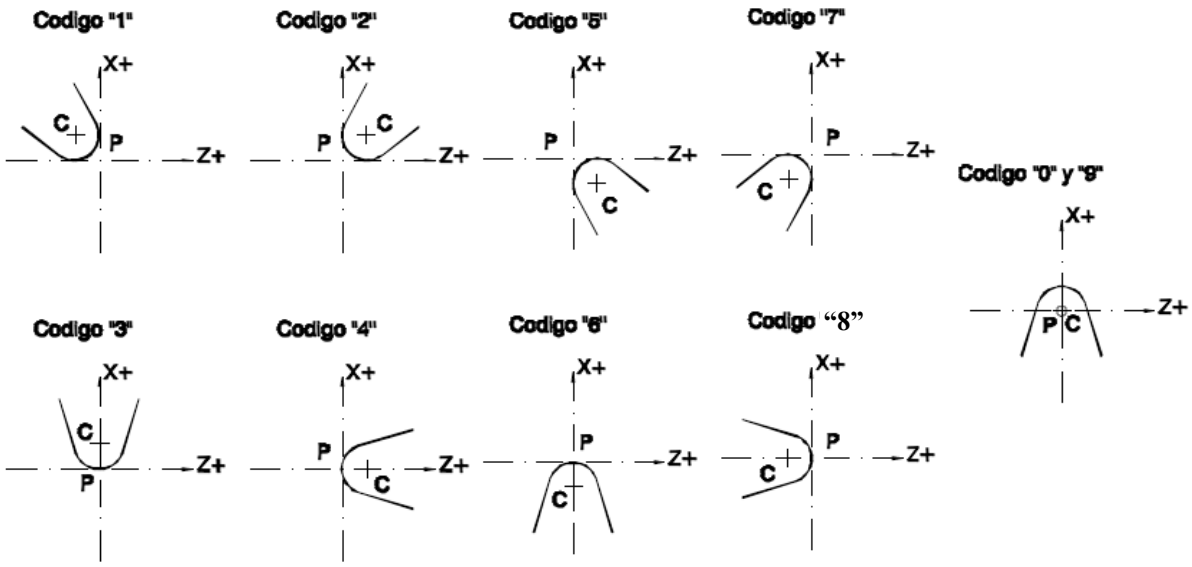



**Figura 52. Códigos de forma para torno FAGOR.**

## Códigos para las trayectorias

En este caso utilizaremos las funciones **G** (funciones preparatorias, desde **G00** hasta **G99**) para programar los movimientos de los distintos elementos del torno y conseguir así el mecanizado deseado.

Nota: G00 es igual a G0; G01 es igual a G1 … G09 es igual a G9.

Con estas funciones podemos indicar los tipos de movimiento, velocidades y otros parámetros. La mayoría de estas funciones son modales. En un mismo bloque o línea del código se pueden incluir más de una función **G**.

Nota: **no son universales**, pueden variar ligeramente de una máquina a otra.

**Tabla 2. Funciones G**

| Función | | Función | |
|---|---|---|---|
| G00 | Movimiento rápido sin corte | G45 | Corrección de herramienta +/+ |
| G01 | Interpolación lineal para dimensiones medias | G46 | Corrección de herramienta +/_ |
| G02 | Interpolación circular en sentido antitrigonométrico (horario) | G47 | Corrección de herramienta -/- |
| G03 | Interpolación circular en sentido trigonométrico (anti-horario) | G48 | Corrección de herramienta -/+ |
| G04 | Parada temporizada | | |
| G05 | Parada suspensiva / interpolación con arista matada | G60 | Posicionado con precisión 1 |
| G07 | Interpolación con arista viva | G61 | Posicionado con precisión 2 |
| G08 | Aceleración / Trayectoria circular tangente a la trayectoria anterior | G63 | Ciclo preparatorio para taladrar |
| G09 | Deceleración / Trayectoria circular definida con 3 puntos | G64 | Cambio de la velocidad de avance |
| G12 | Interpolación en tres dimensiones | G66 | Ciclo fijo |
| G13 | Elección eje X | G68 | Ciclo fijo |
| G14 | Elección eje Y | G69 | Ciclo fijo |
| G15 | Elección eje Z | G72 | Factor de escala |
| G17 | Elección plano XY | G80 | Anulación ciclo fijo |
| G18 | Elección plano YZ | G81 | Ciclo fijo |
| G19 | Elección plano ZX | G82 | Ciclo fijo |
| G20 | Medidas en sistema inglés | G83 | Ciclo fijo |
| G21 | Medidas en unidades métricas | G84 | Ciclo fijo |
| G33 | Fileteado de paso constante | G85 | Ciclo fijo |
| G34 | Fileteado de paso creciente | G86 | Ciclo fijo |
| G35 | Fileteado de paso decreciente | G87 | Ciclo fijo |
| G36 | Redondeado controlado de aristas | G88 | Ciclo fijo |
| G37 | Entrada tangencial | G89 | Ciclo fijo |
| G38 | Salida tangencial | G90 | Programación absoluta |
| G39 | Chaflanes | G91 | Programación relativa |
| G40 | Anulación de la corrección de la herramienta | G92 | Cambio de origen cartesiano |
| G41 | Corrección de herramienta a izquierdas | G93 | Cambio de origen polar |
| G42 | Corrección de herramienta a derechas | G96 | Control de velocidad superficie constante |
| G43 | Corrección de herramienta positiva | G97 | Cancelación del control de velocidad superficial constate |
| G44 | Corrección de herramienta negativa | G98 | Avance por minuto |
| | | G99 | Avance por revolución |

## Tabla 3. Funciones G para torno CNC (ejemplo FAGOR)

| Función | | Función | |
|---|---|---|---|
| **G00** | Movimiento rápido sin corte | **G48*** | Anulación del Tratamiento de bloque único |
| **G01*** | Interpolación lineal para dimensiones medias | **G49** | FEED-RATE programable |
| **G02** | Interpolación circular en sentido antitrigonométrico (horario) | G50 | Carga de dimensiones de la herramienta en tabla |
| **G03** | Interpolación circular en sentido trigonométrico (anti-horario) | G51 | Corrección de las dimensiones de la herramienta en uso |
| G04 | Parada temporizada (duración programada mediante K) | G52 | Comunicación con la RED LOCAL FAGOR |
| **G05** | Interpolación con arista matada | **G53 G59** | Traslados de origen |
| **G07*** | Interpolación con arista viva | G66 | Ciclo fijo de desbastado siguiendo el perfil pieza |
| G08 | Trayectoria circular tangente a la trayectoria anterior | G68 | Ciclo fijo de desbastado (X) |
| G09 | Trayectoria circular definida con 3 puntos | G69 | Ciclo fijo de desbastado (Z) |
| **G14** | Activación del eje C en grados | **G70** | Programación en pulgadas |
| **G15** | Mecanización en la superficie cilíndrica de la pieza | **G71** | Programación en milímetros |
| **G16** | Mecanización en la superficie frontal de la pieza | **G72** | Factor de escala |
| G20 | Llamada a subrutina estandard | G74 | Búsqueda automática de referencia-máquina |
| G21 | Llamada a subrutina paramétrica | G75 | Trabajo con palpador |
| G22 | Definición de subrutina estandard | G75 N2 | Ciclos fijos de palpación |
| G23 | Definición de subrutina paramétrica | G76 | Creación automática de bloques |
| G24 | Final de subrutina | G81 | Ciclo fijo de torneado de tramos rectos |
| G25 | Salto/llamada incondicional | G82 | Ciclo fijo de refrentado de tramos rectos |
| G26 | Salto/llamada condicional si es igual a 0 | G83 | Ciclo fijo de taladrado |
| G27 | Salto/llamada condicional si no es igual a 0 | G84 | Torneado de tramos curvos |
| G28 | Salto/llamada condicional si es menor | G85 | Refrentado de tramos curvos |
| G29 | Salto condicional si es igual o mayor | G86 | Ciclo fijo de roscado longitudinal |
| G30 | Visualizar código de error definido mediante K | G87 | Ciclo fijo roscado frontal |
| G31 | Guardar origen de coordenadas | G88 | Ciclo fijo ranurado longitudinal |
| G32 | Recuperar origen de coordenadas guardado mediante G31 | G89 | Ciclo fijo de ranurado frontal |
| **G33** | Roscado | **G90*** | Programación de cotas absolutas |
| G36 | Redondeo controlado de aristas | **G91** | Programación de cotas incrementales |
| G37 | Entrada tangencial | G92 | Preselección de cotas y limitación del valor máximo de S |
| G38 | Salida tangencial | G93 | Preselección de origen de coordenadas polares |
| G39 | Achaflanado | **G94** | Avance F en mm/min. (0'1 pulgadas/min.) |
| **G40*** | Anulación de compensación de radio | **G95*** | Avance F en mm/rev (0'1 pulgadas/rev) |
| **G41** | Compensación de radio a izquierdas | **G96** | Velocidad S en m/min (pies/min.) (Velocidad de corte constante) |
| **G42** | Compensación de radio a derechas | **G97*** | Velocidad S en rev/min |
| **G47** | Tratamiento de bloque único | | |

**En rojo. Funciones modales.**

***: opciones por defecto en el momento del encendido.**

**Si en un mismo bloque se programan funciones incompatibles, el CNC asume la última.**

**Movimiento rápido sin corte: FUNCIÓN G00**

Con esta función se le está indicando a la máquina que se desplace de un punto a otro a la máxima velocidad permitida (sin realizar corte, en vacío) y en línea recta. Con esta función se suele realizar la primera aproximación de la herramienta a la pieza de trabajo antes de comenzar una pasada de trabajo; y el movimiento de alejamiento de la herramienta una vez terminada una pasada o el programa.

En coordenadas cartesianas: si queremos ir del punto 1 ($x_1$, $z_1$) al punto 2 ($x_2$, $z_2$) debemos escribir G00 seguido de las coordenadas del punto final respecto del origen del programa (si estamos trabajando en coordenadas absolutas) o respecto del punto 1 (si estamos trabajando en coordenadas relativas):

**N01 G00 X$x_2$ Z$z_2$**

**N01 G00 X50 Z100**

Al programar estas trayectorias se debe evitar chocar con la pieza de trabajo.

En coordenadas polares: si queremos ir del punto 1 ($r_1$, $a_1$) al punto 2 ($r_2$, $a_2$) debemos escribir G00 seguido de las coordenadas del punto final respecto del origen del programa (si estamos trabajando en coordenadas absolutas) o respecto del punto 1 (si estamos trabajando en coordenadas relativas):

**N10 G00 R$r_2$ A$a_2$**

**[R: radio y A: ángulo alrededor del eje z]**

**Interpolación lineal: FUNCIÓN G01**

Igual que la anterior, pero en este caso el movimiento se realiza a la velocidad de avance programada para realizar el corte (función **F**). En el caso de que la velocidad de avance no se haya fijado antes se debe incluir en el bloque o línea de código. En coordenadas cartesianas:

**N15 G01 X$x_2$ Z$z_2$ Fv**

**N15 G01 X50 Z100 F100**

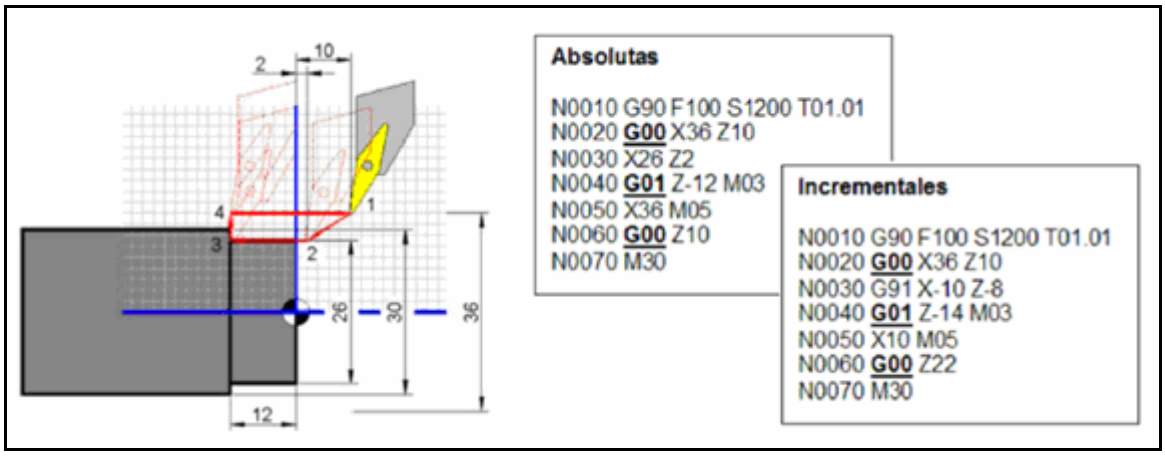



**Figura 53. Ejemplo Función G00 – G01.**

**Interpolación Circular: FUNCIÓN G02 (horario) y G03 (antihorario)**

Con estas funciones se describen trayectorias circulares.

G02 (horario o a derechas); G03 (antihorario o a izquierdas).

Nota: prestar especial atención a las especificaciones de cada máquina.

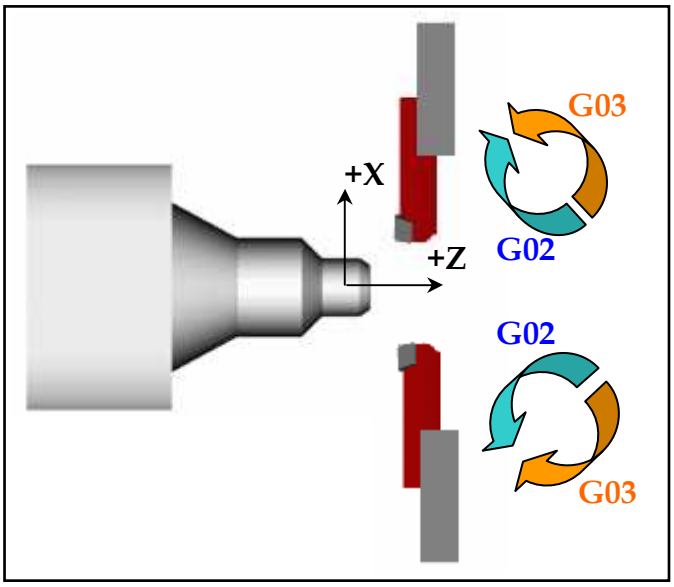



**Figura 54. Sentidos de giro en funciones G02 y G03.**

**Interpolación Circular en coordenadas cartesianas**

En este caso se deben indicar las coordenadas del punto final ($x_2$, $z_2$) y las coordenadas del centro del arco ($x_c$, $z_c$) que queremos describir con respecto al punto inicial ($x_1$, $z_1$).

**N10 G02/G03 X$x_2$ Z$z_2$ I$i_c$ K$k_c$**

Las coordenadas del punto final (2) se indicarán en absolutas o incrementales según estemos trabajando. Las coordenadas del centro del arco se suelen dar respecto al punto inicial (1), para indicarlas en coordenadas absolutas hay que utilizar la función **G06**.

**Interpolación Circular en coordenadas polares**

En este caso se debe indicar el ángulo del arco (A) (desde el origen polar) que localice el punto final y las coordenadas del centro del arco ($x_c$, $z_c$) a describir con respecto al punto inicial ($x_1$, $z_1$)

**N10 G02/G03 A$a_2$ I$i_c$ K$k_c$**

**Interpolación Circular en coordenadas cartesianas y el radio**

En este caso se deben indicar las coordenadas del punto final ($x_2$, $z_2$) y el radio del arco que queremos describir, seguido de un signo positivo (ángulo a describir menor de 180º) o negativo (ángulo a describir mayor de 180º).

**N10 G02/G03 X$x_2$ Z$z_2$ Rr +/-**

En la siguiente figura se muestran las cuatro trayectorias posibles.

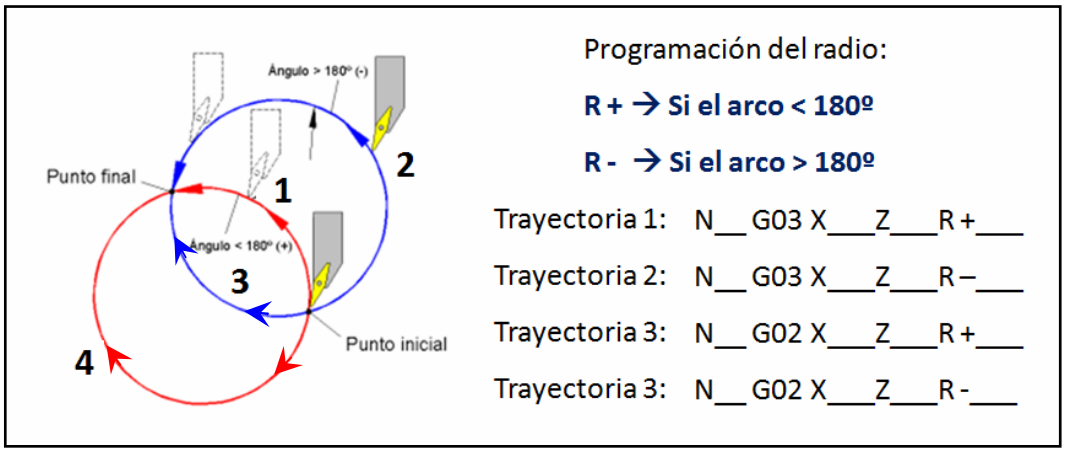



**Figura 55. Interpolación circular en coordenadas rectangulares y radio.**

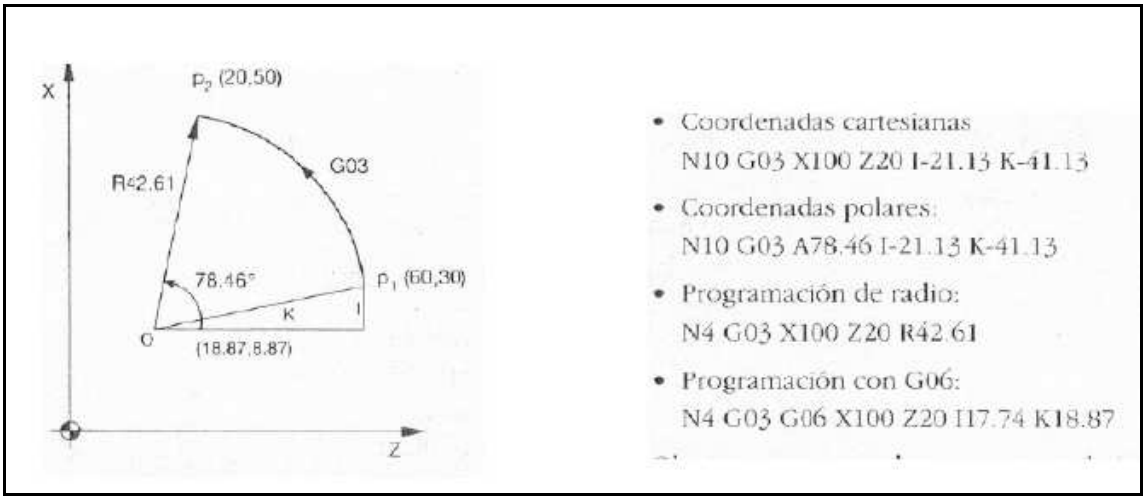



**Figura 56. Ejemplo de interpolación circular.**

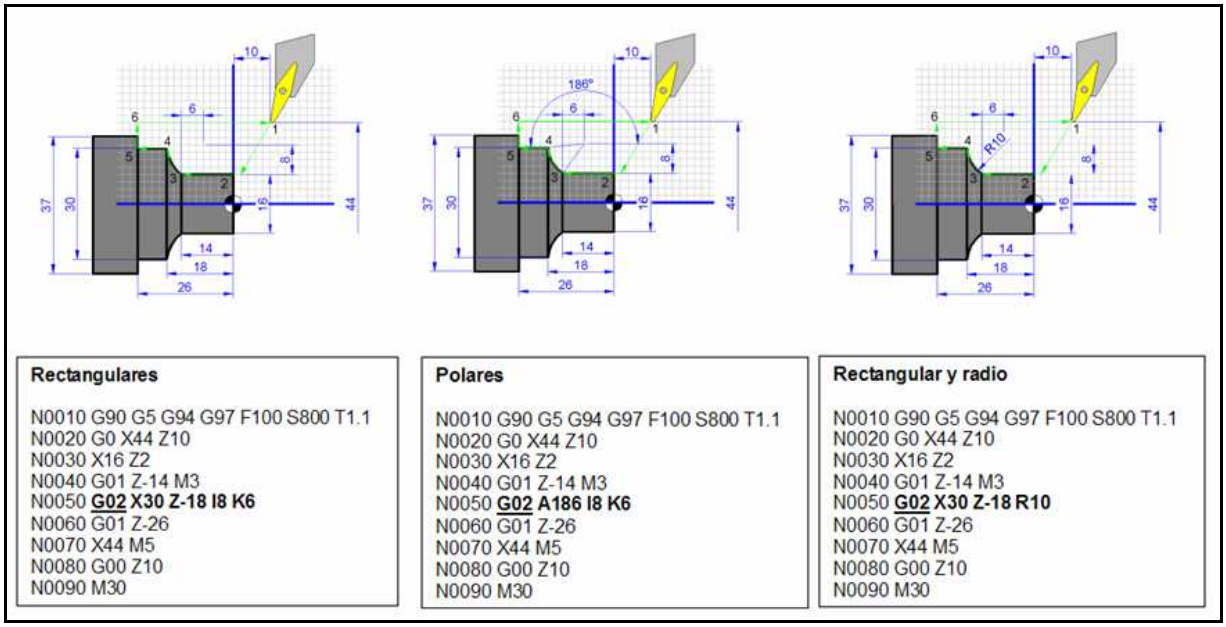



**Figura 57. Ejemplo de interpolación circular (bis).**

### Trayectoria circular tangente a la trayectoria anterior: FUNCIÓN G08

Esta función permite programar una trayectoria circular sin necesidad de indicar el centro del arco a describir, sólo es necesario que exista una trayectoria previa (lineal o circular). Se indica el punto final ($x_2$, $z_2$) y describe una trayectoria hacia dicho punto tangente a la trayectoria anterior. Se puede programar en coordenadas cartesianas:

**N10 G08 X$x_2$ Z$z_2$**

O en coordenadas polares:

**N10 G08 R$r_2$ A$a_2$**

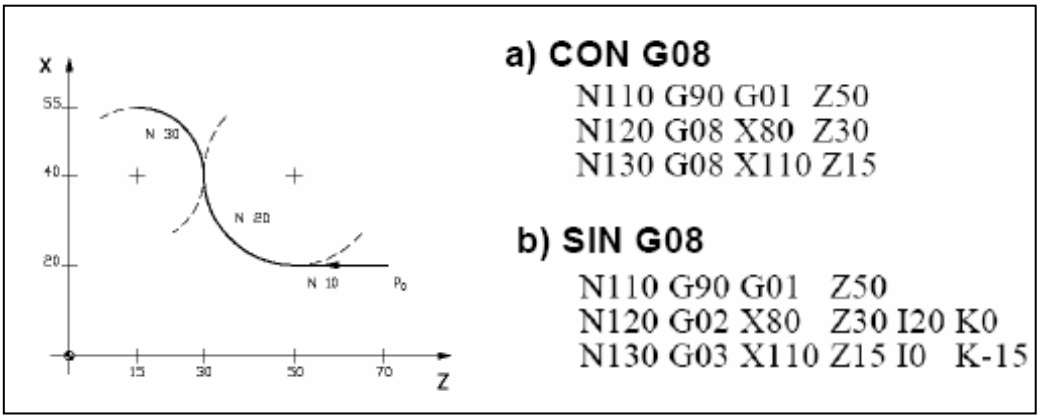



**Figura 58. Ejemplo de trayectoria circular tangente a la trayectoria anterior.**

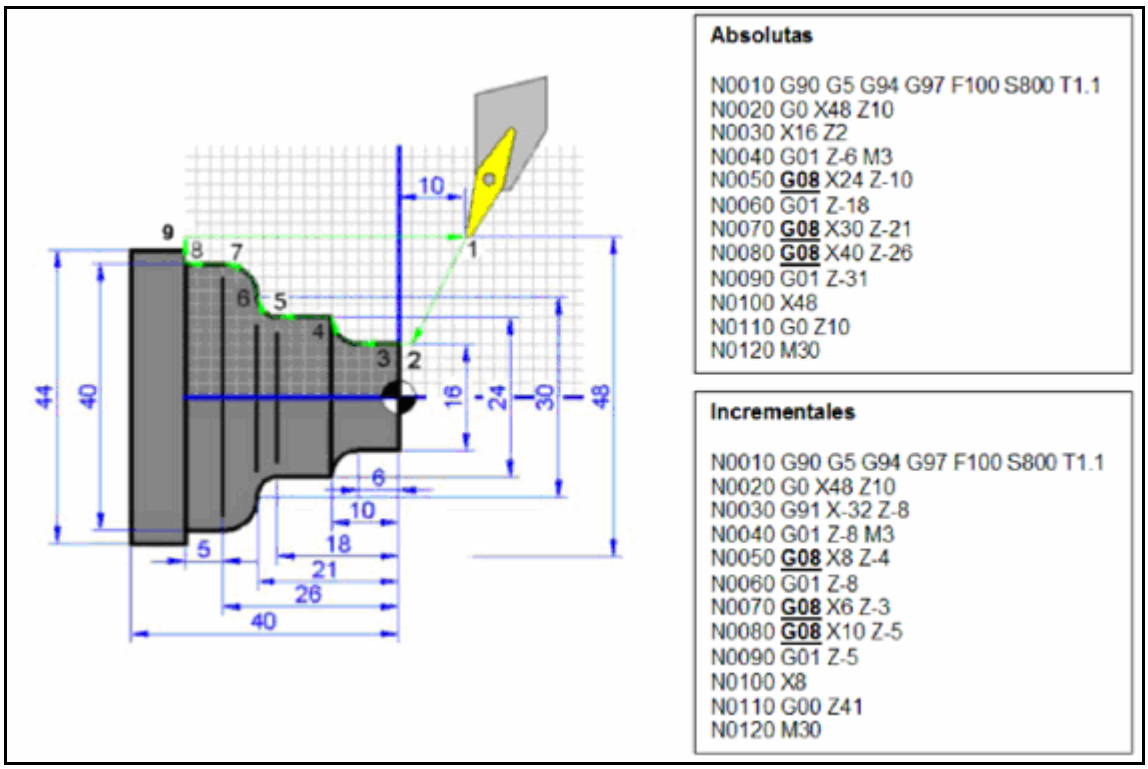



**Figura 59. Ejemplo de trayectorias con función G08.**

**Trayectoria circular definida mediante 3 puntos: FUNCIÓN G09**

En este caso es necesario indicar el punto final ($x_2$, $z_2$) y un punto intermedio (i, k), no es necesario indicar el centro del arco. En coordenadas cartesianas:

**N10 G09 X$x_2$ Z$z_2$ Ii Kk**

En coordenadas polares:

**N10 G09 R$x_2$ A$a_2$ Ii Kk**

Las coordenadas del punto intermedio se deben indicar respecto al origen de la pieza.

**Temporización (parada): FUNCIÓN G04**

Se programa una parada con la letra K, ejemplo 0.5 segundos:

**N10 G04 K0.5**

**Interpolación con arista matada: FUNCIÓN G05**

La ejecución del bloque siguiente del programa empieza antes de que la máquina haya llegado a la posición exacta programada en el bloque donde aparezca la función G05. Es modal.

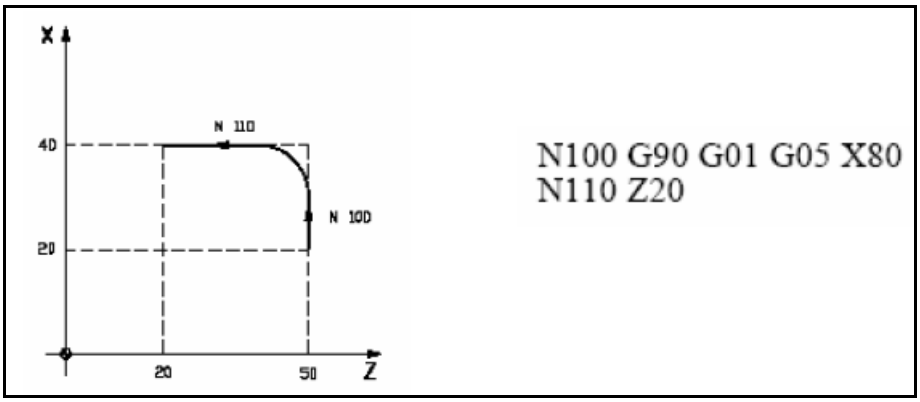



**Figura 60. Ejemplo de interpolación con arista matada.**

**Interpolación con arista viva: FUNCIÓN G07**

La ejecución del bloque siguiente del programa no empieza hasta que la máquina haya llegado a la posición exacta programada en el bloque donde aparezca la función G07. Es modal.

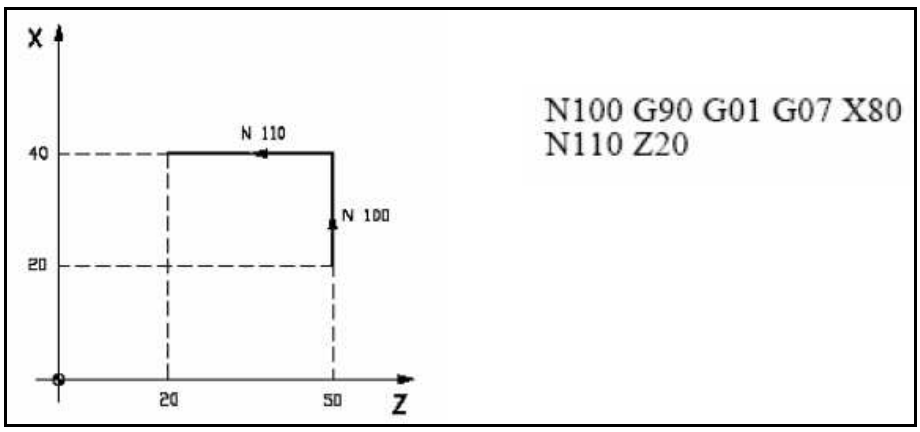



**Figura 61. Ejemplo de interpolación con arista matada.**

**Compensación de la herramienta: FUNCIONES G40-G42**

G40: anula cualquier compensación de la herramienta activa.

G41: compensación del radio a izquierdas.

G42: compensación del radio a derechas.

La compensación de la herramienta (G40, G41 o G42) sólo puede utilizarse en un bloque o línea del código numérico en el que aparezca la función G00 o G01. La compensación de la herramienta debe utilizarse cuando se van a realizar operaciones de contorneado principalmente, o cortes en ángulo… La única situación en la que no debería utilizarse es en el caso de realizar operaciones paralelas al eje X (cilindrado) o al eje X (refrentados).

**Es modal.**

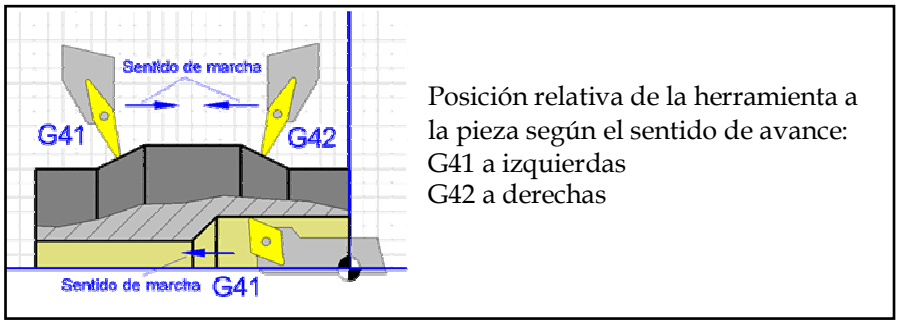



**Figura 62. Compensación a izquierdas o a derechas.**

**Redondeo controlado de aristas: FUNCIÓN G36**

Con esta opción al programar dos trayectorias que se cruzan se realiza un redondeo en la unión de las trayectorias (según el radio indicado). Es necesario realizar dos bloques o líneas de código, en el primero se indica el radio de redondeo y las coordenadas del punto final de la primera línea; en el segundo bloque se indica el punto final de la segunda línea. Generalmente precedido de G01 (indicando corte rectilíneo) o G02/G03 (indicando interpolación circular). No es modal.

Interpolación lineal previa:

**N100 G90 G01 G36 Rr $Xx_1$ $Zz_1$**

**N101 G01 $Xx_2$ $Zz_2$**

Interpolación circular previa:

**N100 G90 G02/G03 G36 Rr $Xx_1$ $Zz_1$ $Ii_c$ $Kk_c$**

**N101 G01 $Xx_2$ $Zz_2$**

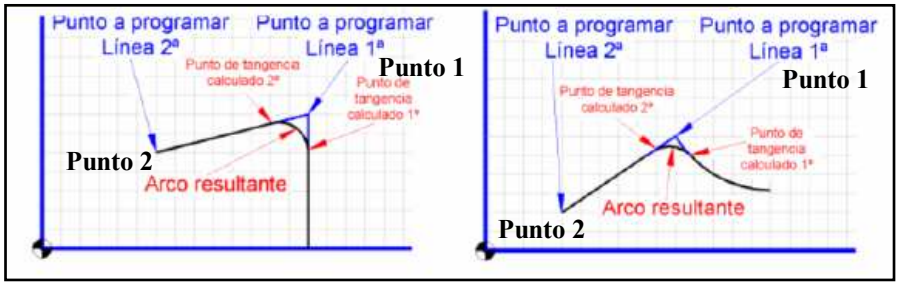



**Figura 63. Redondeo controlado aristas con interpolación lineal previa (izq.) o interpolación circular previa (dcha.).**

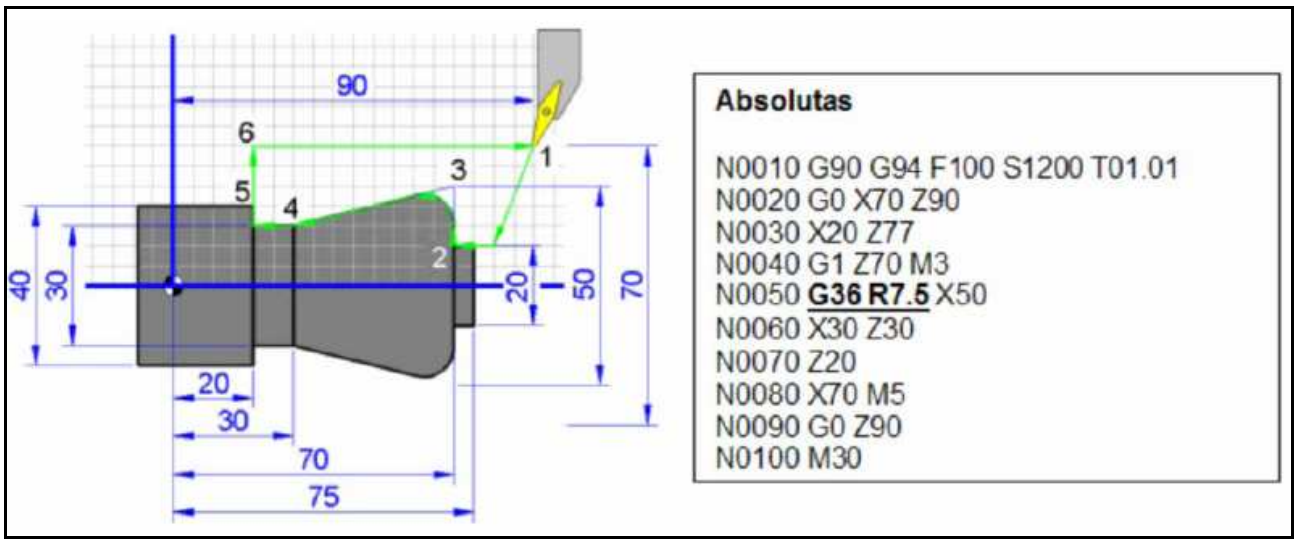



**Figura 64. Ejemplo Redondeo controlado aristas.**

### Chaflanes: FUNCIÓN G39

Con esta opción al programar dos trayectorias que se cruzan se realiza un chaflán en la unión de las trayectorias (según el radio indicado). Es necesario realizar dos bloques o líneas de código, en el primero si indica el radio a obtener y las coordenadas del punto final de la primera línea; en el segundo bloque se indica el punto final de la segunda línea. Generalmente precedido de G01 (indicando corte rectilíneo). No es modal.

Interpolación lineal previa:

**N100 G90 G01 G39 Rr X$x_1$ Z$z_1$**

**N101 G01 X$x_2$ Z$z_2$**

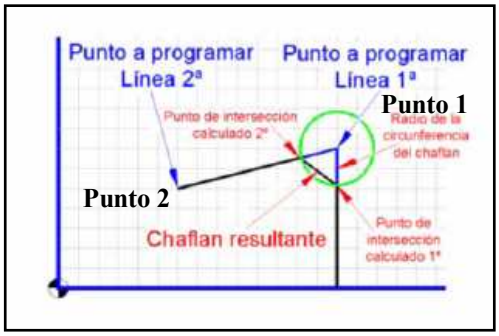



**Figura 65. Función Chaflán.**

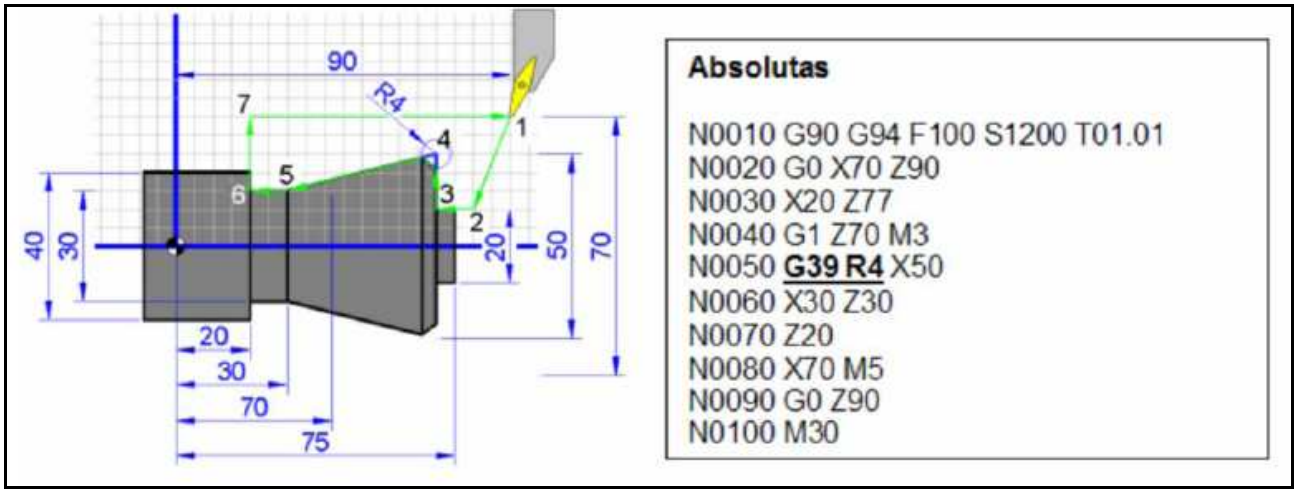



**Figura 66. Ejemplo achaflanado de aristas.**

**Entrada tangencial: FUNCIÓN G37**

Con esta opción le indicamos a la máquina que queremos llegar al punto indicado realizando cierto radio de entrada, en vez de dirigirnos a dicho punto en línea recta. No es modal.

En el bloque de programación debemos indicar el radio de entrada R y las coordenadas del punto al que nos dirigimos:

**N100 G90 G01 G37 Rr $Xx_1$ $Zz_1$**

**N101 G01 $Xx_2$ $Zz_2$ (continua el código, como sea…)**

**Figura 67. Función entrada tangencial.**

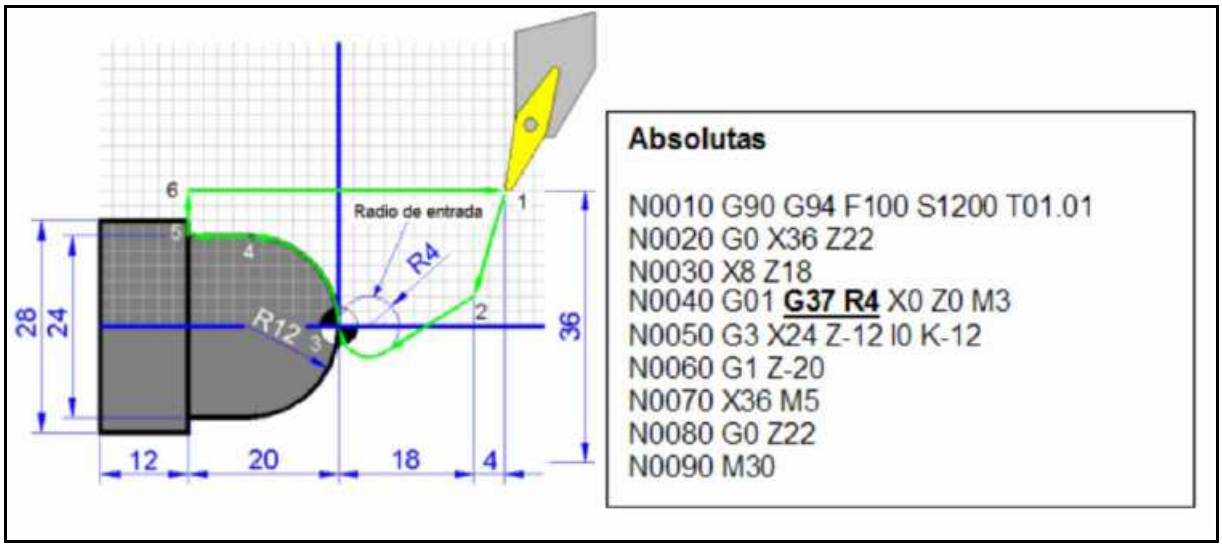



**Figura 68. Ejemplo entrada tangencial.**

**Salida tangencial: FUNCIÓN G38**

Con esta opción le indicamos a la máquina que queremos salir del punto 1 indicado realizando cierto radio de salida, en vez de dirigirnos al punto 2 en línea recta.

En el bloque de programación debemos indicar el radio de salida R y las coordenadas del punto del que vamos a salir:

**N100 G90 G01 G38 Rr $Xx_1$ $Zz_1$**

**N101 G01 $Xx_2$ $Zz_2$ (continua el código, como sea…)**

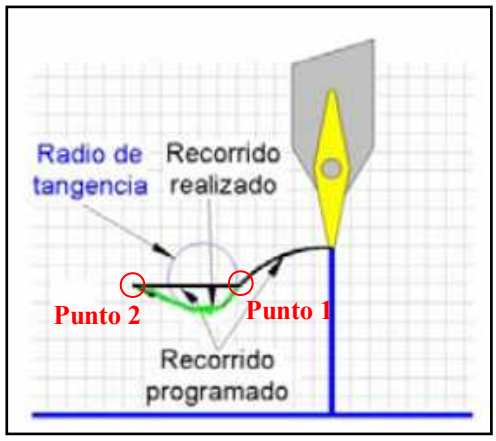



**Figura 69. Función salida tangencial.**

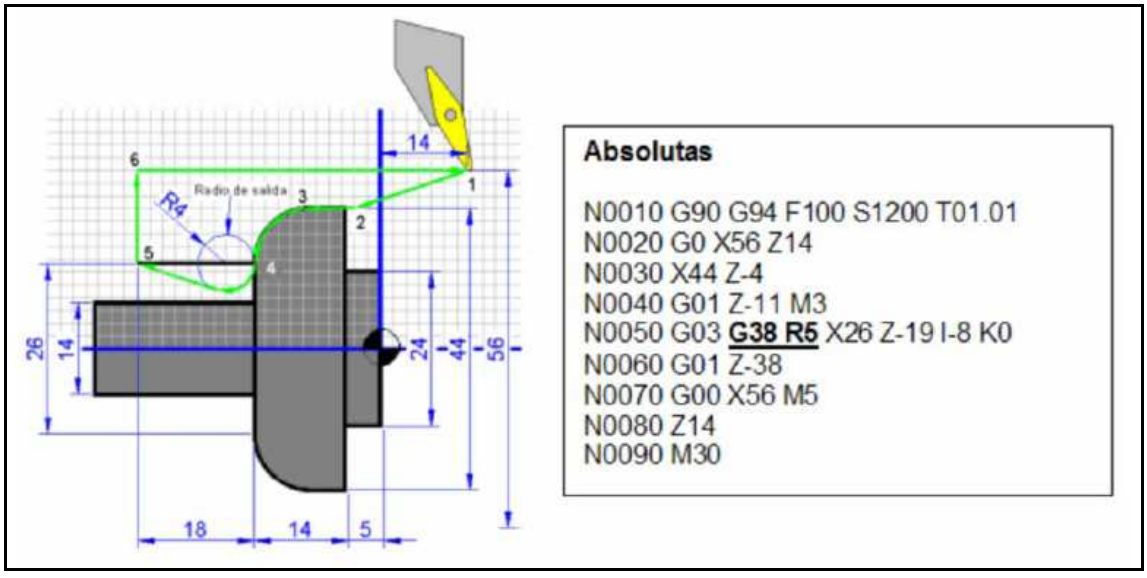



**Figura 70. Ejemplo salida tangencial.**

**Roscado: FUNCIÓN G33**

Esta función nos permite realizar:

- Roscados longitudinales: **N100 G33 Z… K….**
- Roscados frontales: **N100 G33 X… I….**
- Roscados cónicos: **N100 G33 X… Z… K…**

Donde:

X: coordenada final de la rosca según el eje X.

Z: coordenada final de la rosca según el eje Z.

I: paso de la rosca según el eje X (roscado frontal).

K: paso de la rosca según el eje Z (roscado longitudinal o cónico)

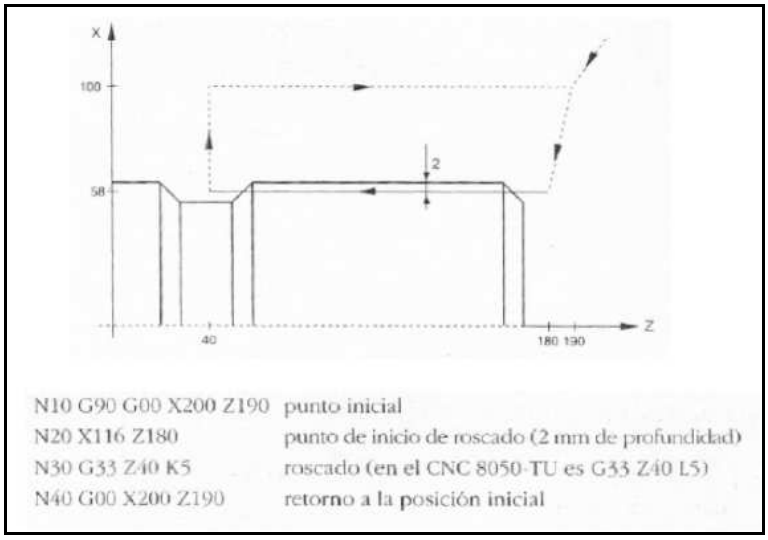



**Figura 71. Roscado longitudinal en una pasada (2 mm de profundidad; k=5 mm paso de rosca en eje Z).**

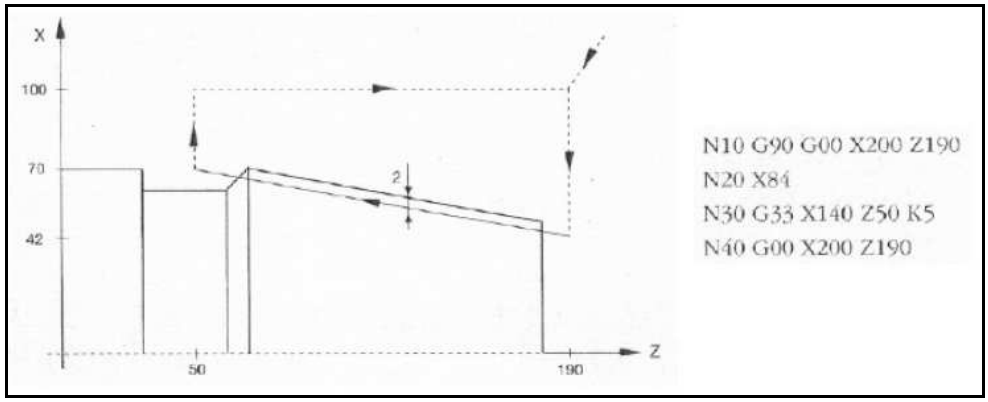



**Figura 72. Roscado cónico en una pasada (2 mm de profundidad; k=5).**

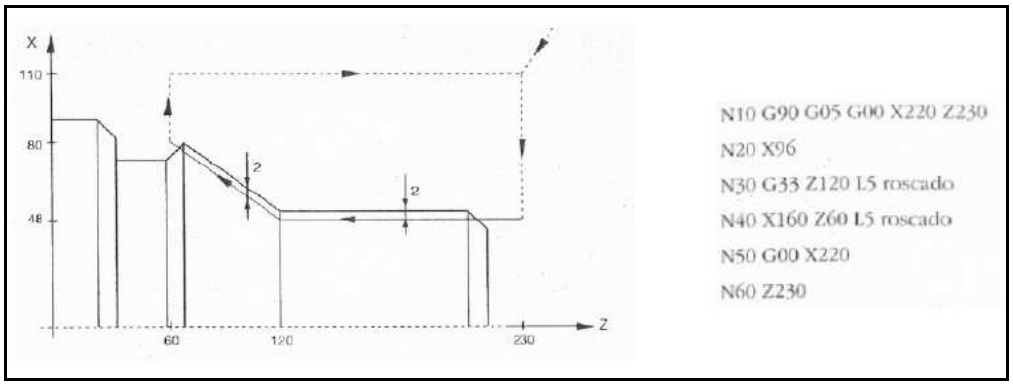



**Figura 73. Roscado longitudinal y cónico en una pasada (2 mm de profundidad; k=5 mm).**

### Cambio de origen: FUNCIÓN G92

Esta función debe programarse en un bloque o línea independiente. Es modal. Se anula con ella misma o utilizando las funciones G31 (guardar origen) o G32 (recuperar origen guardado). Se escribe G92 seguido de las coordenadas del nuevo origen.

**N100 G92 $Xx_o$ $Zz_o$**

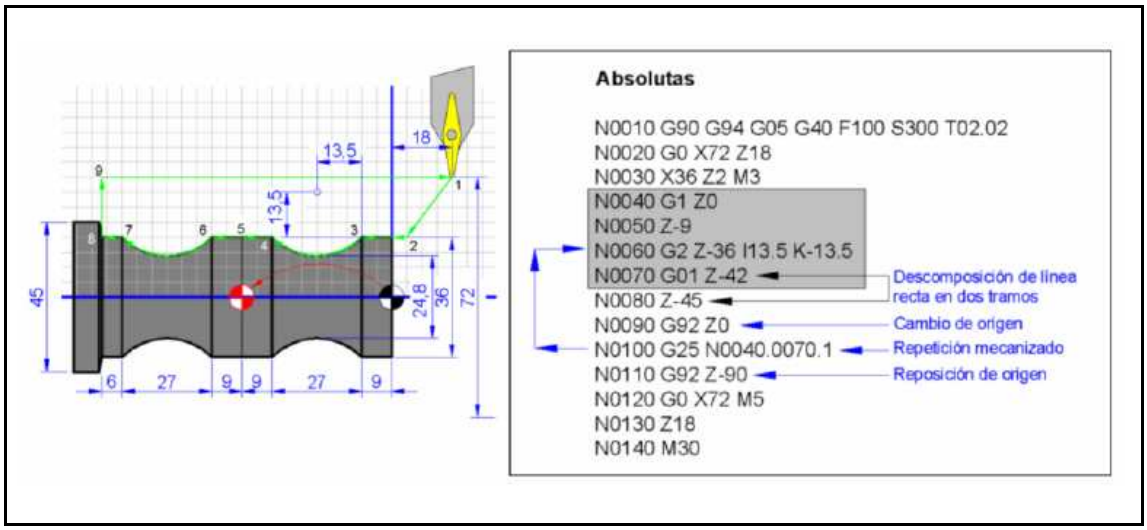



**Figura 74. Cambio de origen en Z.**

Las funciones G31 y G32 son también modales y deben programarse en un bloque o línea independiente.

### Factor de escala: FUNCIÓN G72

Debe programarse en un bloque independiente. Se escribe G72 seguido de K y el factor de escala a introducir. Es modal. El factor de escala se aplica desde el cero pieza o cero programa.

**N100 G72 K…**

Para anularlo:

**N100 G72 K1**

**Programación de ciclos fijos**

Hasta ahora se han visto funciones para programación en código ISO que nos permitían describir trayectorias individuales. Con este tipo de operaciones sería necesario un gran número de bloques para programar el mecanizado de una pieza como la mostrada en la figura, ya que para cada pasada o trayectoria de la herramienta sería necesario un bloque o línea de código.

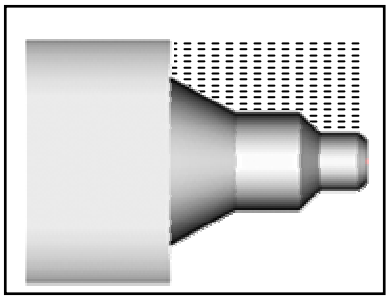


**Figura 75. Ejemplo de pasadas en mecanizado con torno.**

Para facilitar la programación del mecanizado en tornos CNC existen una serie de funciones para ciclos fijos, aquellos ciclos que son más habituales. Con este tipo de funciones podemos en un solo bloque o línea de código programar un ciclo completo (que incluya desbastado y acabado). Estos ciclos incluyen el movimiento de aproximación rápido si corte, movimientos de corte (pasadas), pudiendo programar profundidades de desbaste y de acabado (así como la velocidad de acabado).

En los códigos de ciclo fijo trabajamos con una serie de parámetros (**P**) cuyo valor numérico se incluye utilizando la letra **K**:

**P1=K2**

A continuación veremos los ciclos fijos más utilizados en tornos CNC

**Nota: esto ciclos fijos pueden variar de un modelo de máquina a otro.**

## DEBASTADO EN EL EJE X: FUNCIÓN G68

Con esta función se realiza el perfil mostrado en la Figura 76.

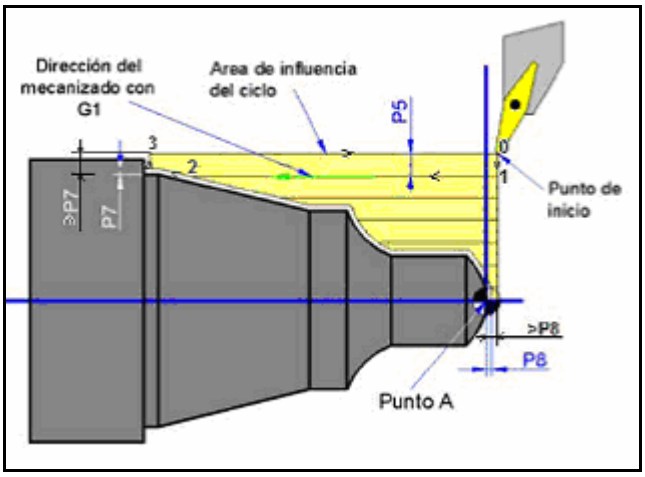



**Figura 76. Esquema Función G68: Desbastado en el Eje X.**

El bloque de programación sería el siguiente:

**N100 G68 P0=K… P1=K… P5=K… P7=K… P8=K… P9=K… P13=K101 P14=K???**

**N101 X25 Z-15 (a continuación se escribe el perfil final deseado, a partir del punto A)**

**N102 X25 Z-40**

**N103 X15 Z-40**

**N104 X15 Z-60**

**…**

**N??? X10 Z-60**

Donde:

**P0**: Cota en X del punto A (punto inicial del perfil).

**P1**: Cota en Z del punto A.

**P5**: Profundidad de pasada máxima (en eje X). La profundidad real dependerá del número de pasadas

**P7**: Profundidad de pasada de acabado (en eje X).

**P8**: Profundidad de pasada de acabado (en eje Z).

**P9**: Velocidad de acabado. (Si es igual a 0 se realiza una pasada final de desbaste con las profundidades P7 y P8 pero a la velocidad de corte programada; si es negativo no se realiza pasada de acabado)

**P13**: Es el número del primer bloque que define el perfil.

**P14**: Es el número del último bloque que define el perfil.

Comentarios.

- Al llamar al ciclo, la herramienta debe estar en el punto 0 (Fig. 76).
- Al programar el perfil no hay que programar el punto inicial A (ya está definido por los parámetros P0 y P1).
- Los parámetros (F, S…) pueden programarse antes o en el mismo bloque. Las condiciones de salida son G00 (mov. rápido) y G90 (coord. absolutas).
- El perfil puede estar formado por tramos rectos y/o curvos (siempre en cartesianas, siempre indicando los dos ejes y en absolutas)
- Tramos curvos siempre (**N10 G02/G03 X$x_2$ Z$z_2$ I$i_c$ K$k_c$**) con I y K del centro, con respecto al punto inicial de arco.
- Si en el **perfil** se programan funciones F, S, T ó M, serán ignoradas excepto en la pasada de acabado.
- El ciclo finaliza en el punto 0.
- Se puede trabajar con compensación de radio de herramienta (G41 o G42) siempre que el último movimiento antes de la llamada del ciclo fijo haya sido en G00.
- Los movimientos del punto 1 al 2 y del 2 al 3 se efectúan a la velocidad de avance programada (F), mientras que del 0 al 1 y del 3 al 0 se efectúan en rápido.

## CICLO FIJO DE DEBASTADO EN EL EJE Z: FUNCIÓN G69

Con esta función se realiza el perfil mostrado en la Figura 77.

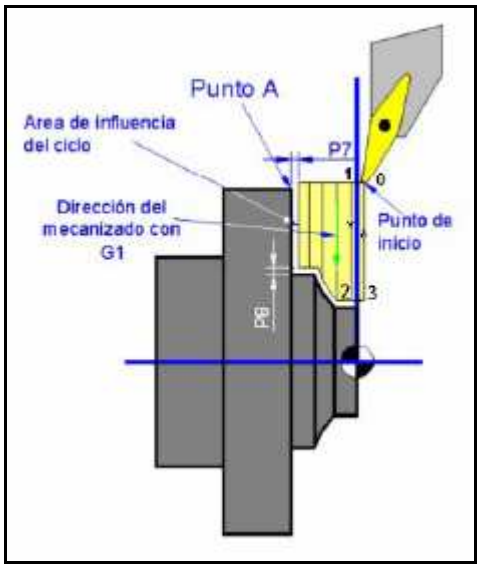



**Figura 77. Esquema Función G69: Ciclo Fijo de Desbastado en el Eje Z.**

El bloque de programación sería el siguiente:

**N100 G69 P0=K… P1=K… P5=K… P7=K… P8=K… P9=K… P13=K101 P14=K???**

**N101 X25 Z-15 (a continuación se escribe el perfil final deseado, a partir del punto A)**

**N102 X25 Z-40**

**N103 X15 Z-40**

**N104 X15 Z-60**

**…**

**N??? X10 Z-60**

Donde:

**P0**: Cota en X del punto A (punto inicial del perfil).

**P1**: Cota en Z del punto A.

**P5**: Profundidad de pasada máxima (en eje Z). La profundidad real dependerá del número de pasadas

**P7**: Profundidad de pasada de acabado (en eje Z).

**P8**: Profundidad de pasada de acabado (en eje X).

**P9**: Velocidad de acabado. (Si es igual a 0 se realiza una pasada final de desbaste con las profundidades P7 y P8 pero a la velocidad de corte programada; si es negativo no se realiza pasada de acabado)

**P13**: Es el número del primer bloque que define el perfil.

**P14**: Es el número del último bloque que define el perfil.

## CICLO FIJO DE CILINDRADO DE TRAMOS RECTOS: FUNCIÓN G81

Con esta función se realiza el perfil mostrado en la Figura 78.

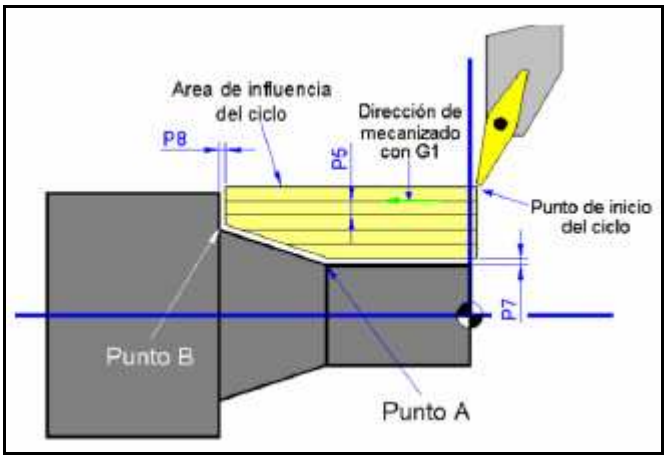



**Figura 78. Esquema Función G81: Ciclo Fijo de Cilindrado de Tramos Rectos.**

El bloque de programación sería el siguiente:

**N100 G81 P0=K… P1=K… P2=K… P3=K… P5=K… P7=K… P8=K… P9=K…**

Donde:

**P0**: Cota en X del punto A.

**P1**: Cota en Z del punto A.

**P2**: Cota en X del punto B.

**P3**: Cota en Z del punto B.

**P5**: Profundidad de pasada máxima (en eje X). La profundidad real dependerá del número de pasadas

**P7**: Profundidad de pasada de acabado (en eje X).

**P8**: Profundidad de pasada de acabado (en eje Z).

**P9**: Velocidad de acabado. (Si es igual a 0 se realiza una pasada final de desbaste con las profundidades P7 y P8 pero a la velocidad de corte programada; si es negativo no se realiza pasada de acabado)

Comentarios.

- El ciclo comienza a partir de la posición inicial de la herramienta.
- Si se indica pasada de acabado, el ciclo finaliza en el punto de inicio. En caso contrario, finaliza en el punto inicial de la última pasada.

## CICLO FIJO DE REFRENTADO DE TRAMOS RECTOS: FUNCIÓN G82

Con esta función se realiza el perfil mostrado en la Figura 79.

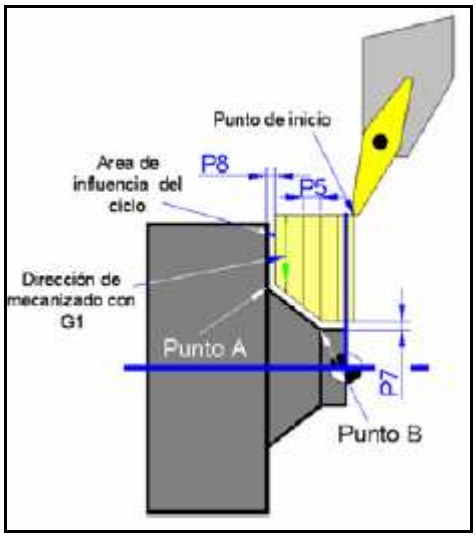



**Figura 79. Esquema Función G82: Ciclo Fijo de Refrentado de Tramos Rectos.**

El bloque de programación sería el siguiente:

**N100 G82 P0=K… P1=K… P2=K… P3=K… P5=K… P7=K… P8=K… P9=K…**

Donde:

**P0**: Cota en X del punto A.

**P1**: Cota en Z del punto A.

**P2**: Cota en X del punto B.

**P3**: Cota en Z del punto B.

**P5**: Profundidad de pasada máxima (en eje Z). La profundidad real dependerá del número de pasadas

**P7**: Profundidad de pasada de acabado (en eje X).

**P8**: Profundidad de pasada de acabado (en eje Z).

**P9**: Velocidad de acabado. (Si es igual a 0 se realiza una pasada final de desbaste con las profundidades P7 y P8 pero a la velocidad de corte programada; si es negativo no se realiza pasada de acabado)

Comentarios.

- El ciclo comienza a partir de la posición inicial de la herramienta.
- Si se indica pasada de acabado, el ciclo finaliza en el punto de inicio. En caso contrario, finaliza en el punto inicial de la última pasada.

## CICLO FIJO DE CILINDRADO DE TRAMOS CURVOS: FUNCIÓN G84

Con esta función se realiza el perfil mostrado en la Figura 80.

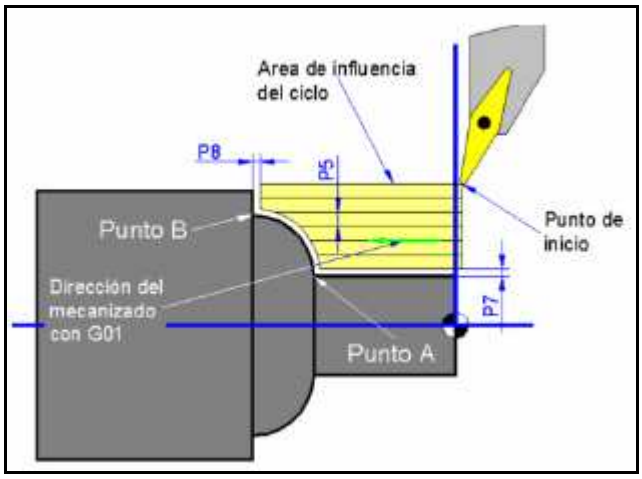



**Figura 80. Esquema Función G84: Ciclo Fijo de Cilindrado de Tramos Curvos.**

El bloque de programación sería el siguiente:

**N100 G84 P0=K… P1=K… P2=K… P3=K… P5=K… P7=K… P8=K… P9=K… P18=K… P19=K…**

Donde:

**P0**: Cota en X del punto A.

**P1**: Cota en Z del punto A.

**P2**: Cota en X del punto B.

**P3**: Cota en Z del punto B.

**P5**: Profundidad de pasada máxima (en eje X). La profundidad real dependerá del número de pasadas

**P7**: Profundidad de pasada de acabado (en eje X).

**P8**: Profundidad de pasada de acabado (en eje Z).

**P9**: Velocidad de acabado. (Si es igual a 0 se realiza una pasada final de desbaste con las profundidades P7 y P8 pero a la velocidad de corte programada; si es negativo no se realiza pasada de acabado)

**P18**: distancia de A al centro del arco en el eje X **(en radios)**.

**P19**: distancia de A al centro del arco en el eje Z.

Comentarios.

- El ciclo comienza a partir de la posición inicial de la herramienta.
- Si se indica pasada de acabado, el ciclo finaliza en el punto de inicio. En caso contrario, finaliza en el punto inicial de la última pasada.

## CICLO FIJO DE REFRENTADO DE TRAMOS CURVOS: FUNCIÓN G85

Con esta función se realiza el perfil mostrado en la Figura 81.

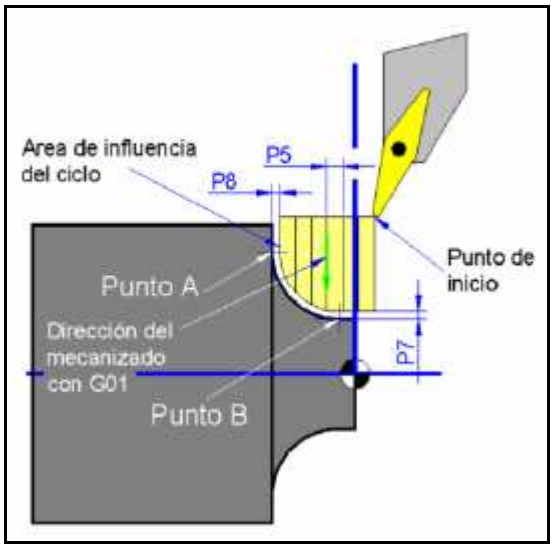



**Figura 81. Esquema Función G85: Ciclo Fijo de Refrentado de Tramos Curvos.**

El bloque de programación sería el siguiente:

**N100 G85 P0=K… P1=K… P2=K… P3=K… P5=K… P7=K… P8=K… P9=K… P18=K… P19=K…**

Donde:

**P0**: Cota en X del punto A.

**P1**: Cota en Z del punto A.

**P2**: Cota en X del punto B.

**P3**: Cota en Z del punto B.

**P5**: Profundidad de pasada máxima (en eje Z). La profundidad real dependerá del número de pasadas

**P7**: Profundidad de pasada de acabado (en eje X).

**P8**: Profundidad de pasada de acabado (en eje Z).

**P9**: Velocidad de acabado. (Si es igual a 0 se realiza una pasada final de desbaste con las profundidades P7 y P8 pero a la velocidad de corte programada; si es negativo no se realiza pasada de acabado)

**P18**: distancia de A al centro del arco en el eje X **(en radios)**.

**P19**: distancia de A al centro del arco en el eje Z.

Comentarios.

- El ciclo comienza a partir de la posición inicial de la herramienta.
- Si se indica pasada de acabado, el ciclo finaliza en el punto de inicio. En caso contrario, finaliza en el punto inicial de la última pasada.

## CICLO FIJO DE SEGUIMIENTO DE PERFIL: FUNCIÓN G66

Esta función se suele utilizar para mecanizar un perfil en varias pasadas sobre piezas con preforma (el perfil sin acabar) (Fig. 82). Normalmente moldes para botellas, coquillas, etc...

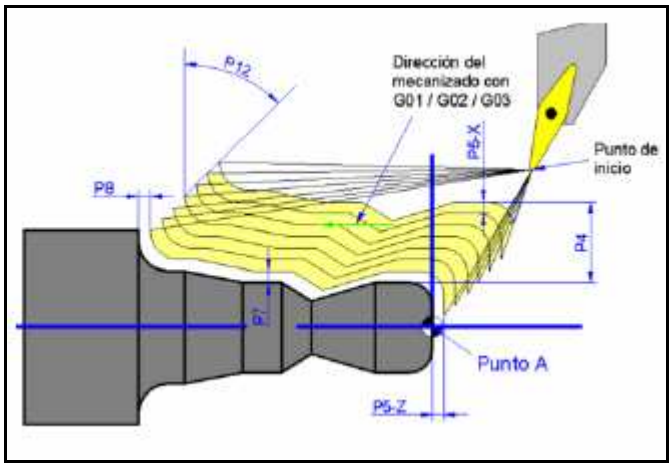



**Figura 82. Esquema Función G66: Ciclo Fijo de Seguimiento de Perfil.**

El bloque de programación sería el siguiente:

**N100 G66 P0=K… P1=K… P4=K… P5=K… P7=K… P8=K… P9=K… P12=K… P13=K101 P14=K??**

**N101 X25 Z-15 (a continuación se escribe el perfil final deseado, a partir del punto A)**

**N102 X25 Z-40**

**N103 X15 Z-40**

**N104 X15 Z-60**

**…**

**N??? X10 Z-60**

Donde:

**P0**: Cota en X del punto A.

**P1**: Cota en Z del punto A.

**P4**: Sobrante del material.

- Si la pieza a mecanizar es de fundición, será la parte en exceso de la pieza. Si se parte de un bruto cilíndrico, será la diferencia entre el diámetro del bruto y el diámetro menor del perfil.

- Debe ser mayor o igual que la profundidad de pasada de acabado.

- Se interpretará como sobrante en X o en Z dependiendo del valor de P12.

**P5**: Profundidad de pasada máxima (en eje X). La profundidad real dependerá del número de pasadas

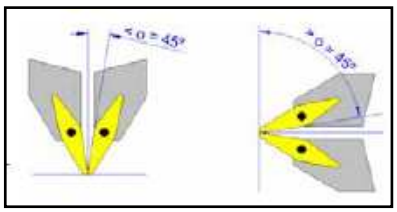
**P7**: Profundidad de pasada de acabado (en eje X).

**P8**: Profundidad de pasada de acabado (en eje Z).

**P9**: Velocidad de acabado. (Si es igual a 0 se realiza una pasada final de desbaste con las profundidades P7 y P8 pero a la velocidad de corte programada; si es negativo no se realiza pasada de acabado)

**P12**: ángulo de la cuchilla. Es el ángulo de corte de la herramienta.

- Si es menor o igual a 45º se interpretará como sobrante de material en X.
- Si es mayor a 45º, como sobrante en Z.



**P13**: Es el número del primer bloque que define el perfil.

**P14**: Es el número del último bloque que define el perfil.

Comentarios.

- Al llamar al ciclo, la herramienta debe estar en el punto de inicio (Fig. 82).
- Al programar el perfil no hay que programar el punto inicial A (ya está definido por los parámetros P0 y P1).
- Los parámetros (F, S…) pueden programarse antes o en el mismo bloque. Las condiciones de salida son G00 (mov. rápido) y G90 (coord. absolutas).
- El perfil puede estar formado por tramos rectos y/o curvos, entradas tangenciales, salidas tangenciales y chaflanes, en programación absoluta o en incremental.
- Los movimientos de aproximación y alejamiento se hacen en rápido y los demás a la velocidad programada.
- En el código del **perfil** no puede ir ninguna función T.
- El ciclo finaliza en el punto 0.
- Se puede trabajar con compensación de radio de herramienta (G41 o G42).

## CICLO FIJO DE RANURADO EN EL EJE X: FUNCIÓN G88

Con esta función se realiza el perfil mostrado en la Figura 83.

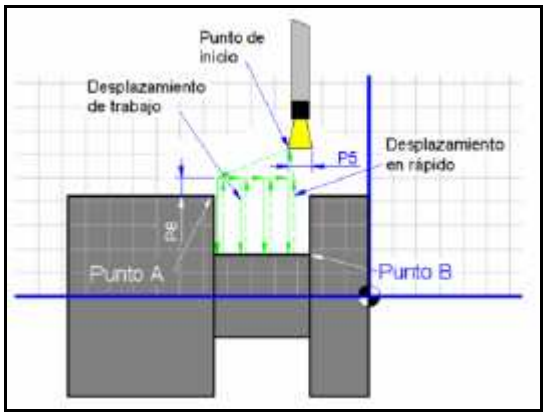



**Figura 83. Esquema Función G88: Ciclo Fijo de Ranurado en el Eje X.**

El bloque de programación sería el siguiente:

**N100 G88 P0=K… P1=K… P2=K… P3=K… P5=K… P6=K… P15=K…**

Donde:

**P0**: Cota en X del punto A.

**P1**: Cota en Z del punto A.

**P2**: Cota en X del punto B.

**P3**: Cota en Z del punto B.

**P5**: Ancho de la cuchilla.

**P6**: Distancia de seguridad.

**P15**: Tiempo que permanece la herramienta en el fondo de la ranura en cada pasada.

Comentarios.

- Al llamar al ciclo, la herramienta debe estar en el punto inicio (Fig. 83).
- Las condiciones de mecanizado (F, S…) deben programarse antes de la llamada al ciclo.
- Las condiciones de salida son G00 (mov. rápido), G40 (sin compensación herramienta) y G90 (coord. absolutas).
- El movimiento desde la distancia de seguridad hasta el fondo de la ranura se realiza a la velocidad programada; el resto de movimientos se realizan a velocidad rápida.
- El paso real calculado por el control será menor o igual que la anchura de la cuchilla.
- El ciclo finaliza en el punto inicial.

## CICLO FIJO DE RANURADO EN EL EJE Z: FUNCIÓN G89

Con esta función se realiza el perfil mostrado en la Figura 84.

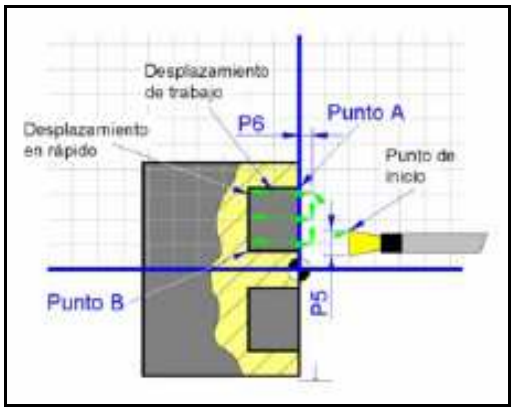



**Figura 84. Esquema Función G89: Ciclo Fijo de Ranurado en el Eje Z.**

El bloque de programación sería el siguiente:

**N100 G89 P0=K… P1=K… P2=K… P3=K… P5=K… P6=K… P15=K…**

Donde:

**P0**: Cota en X del punto A.

**P1**: Cota en Z del punto A.

**P2**: Cota en X del punto B.

**P3**: Cota en Z del punto B.

**P5**: Ancho de la cuchilla.

**P6**: Distancia de seguridad.

**P15**: Tiempo que permanece la herramienta en el fondo de la ranura en cada pasada.

Comentarios (idem que G88).

## CICLO FIJO DE TALADRADO: FUNCIÓN G83

Función específica para el taladrado en torno CNC (Figura 85).

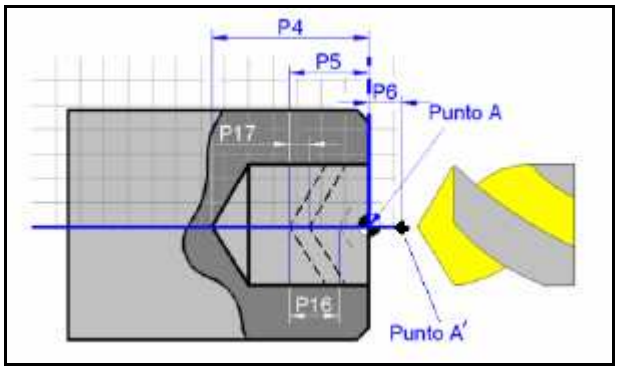



**Figura 85. Esquema Función G83: Ciclo Fijo de Taladrado.**

El bloque de programación sería el siguiente:

**N100 G83 P0=K… P1=K… P4=K… P5=K… P6=K… P15=K… P16=K… P17=K…**

Donde:

**P0**: Cota en X del punto A.

**P1**: Cota en Z del punto A.

**P4**: Profundidad del agujero.

**P5**: Pasada máxima (profundidad de agujero que realiza la broca en cada pasada, luego retrocede lo indicado en P16 para retirar viruta y refrigerarse).

**P6**: Distancia de seguridad a mantener en cada movimiento de acercamiento antes de la primera pasada.

**P15**: Tiempo (seg.) que permanece la herramienta en el fondo del agujero en cada pasada (en el punto final de cada pasada).

**P16**: Alejamiento en G00 (después de cada pasada) (en Z). Lo que retrocede la herramienta después de cada pasada. Si es 0, vuelve a la distancia de seguridad indicada en P6.

**P17**: Cota de acercamiento (antes de cada pasada) (en Z). Indica hasta que distancia, de la profundidad alcanzada en la pasada anterior, debe acercarse la herramienta a velocidad rápida.

Comentarios.

- Las condiciones de salida son G00 (mov. rápido), G07 (arista viva), G40 (sin compensación herramienta) y G90 (coord. absolutas).
- El ciclo comienza con un acercamiento rápido al punto A' y finaliza en el mismo punto.

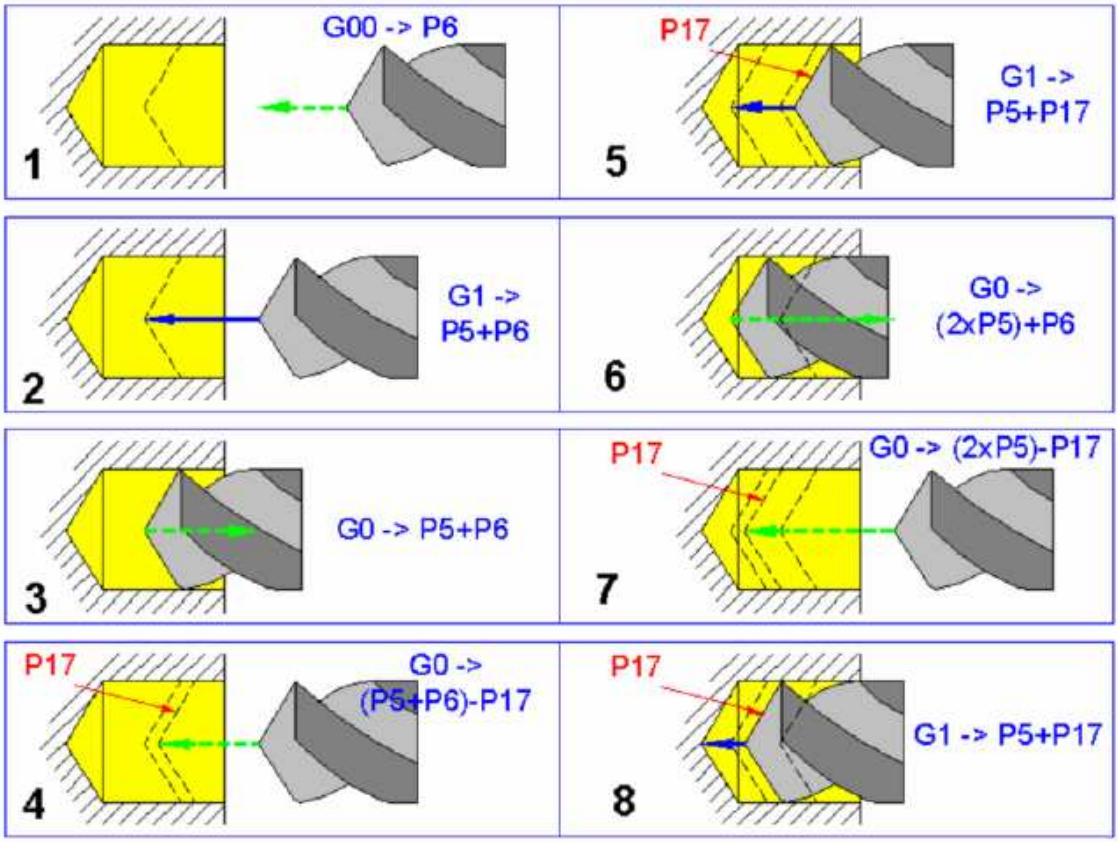



**Figura 86. Ejemplo funcionamiento del Ciclo Fijo de Taladrado G83); con P16=K0.**

## CICLO FIJO DE ROSCADO: FUNCIÓN G86

Función específica para el roscado en torno CNC (Figura 87).

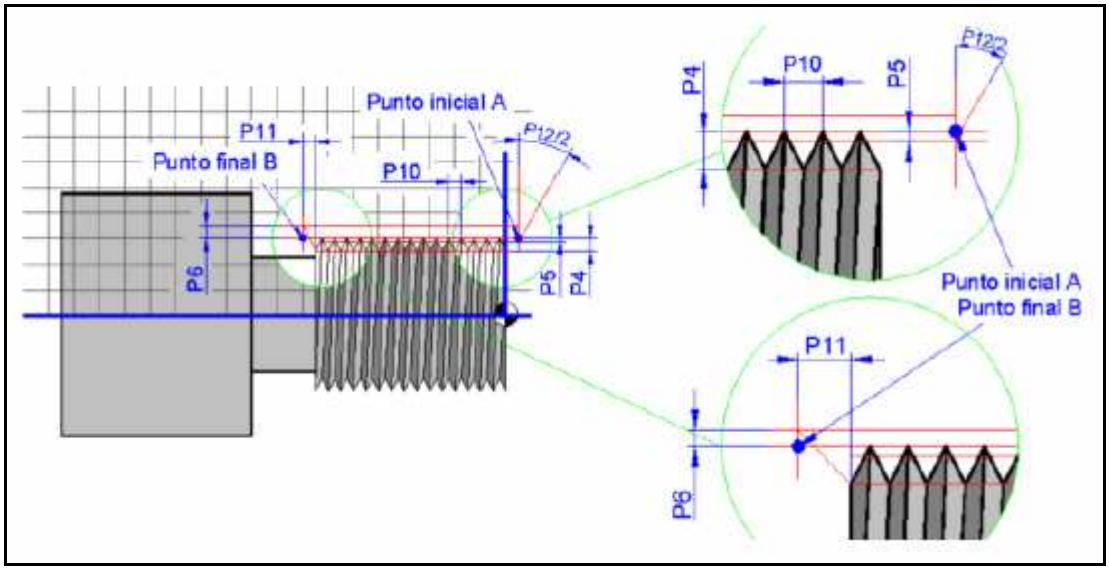



**Figura 87. Esquema Función G86: Ciclo Fijo de Roscado.**

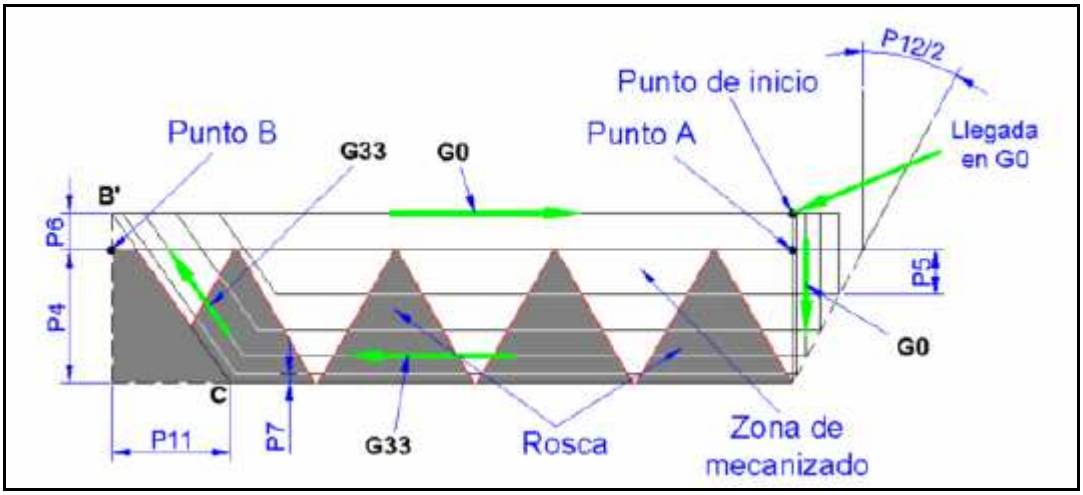



**Figura 88. Roscado Cilíndrico.**

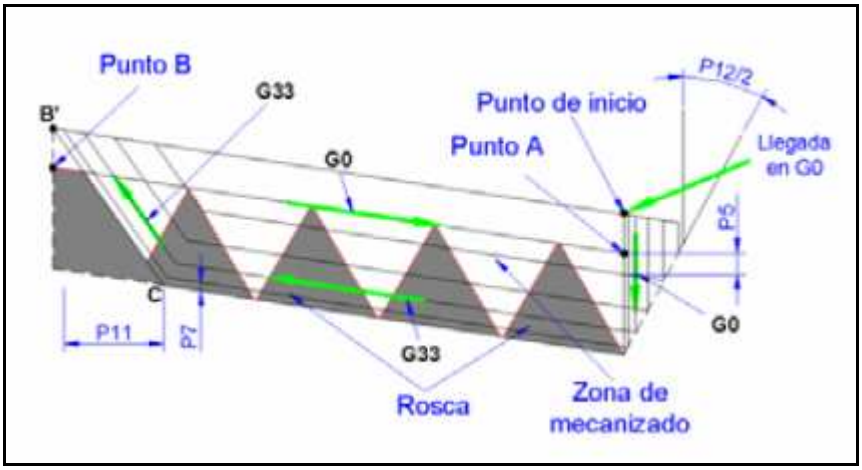



**Figura 89. Roscado Cónico.**

El bloque de programación sería el siguiente:

**N100 G86 P0=K… P1=K… P2=K… P3=K… P4=K… P5=K… P6=K… P7=K… P10=K… P11=K… P12=K…**

Donde:

**P0**: Cota en X del punto A (punto inicial de la rosca).

**P1**: Cota en Z del punto A.

**P2**: Cota en X del punto B (punto final de la rosca).

**P3**: Cota en Z del punto B.

**P4**: Profundidad de rosca **(en radios)**. Positivo para roscas exteriores; negativo para interiores (depende del tipo de plaquita; manuales).

**P5**: Profundidad de la primera pasada. Las siguientes pasadas dependen del signo de P5:

- Positivo: la profundidad de las siguientes pasadas será P5·√2, P5·√3, … , P5·√n; hasta alcanzar la profundida de acabado. Cada pasada tendrá menor profundidad que la anterior. El volumen de viruta arrancada constante.
- Negativo: todas las pasadas con profundidad igual a P5.
- Recomendación de número de pasadas según el paso de rosca:

| Paso (mm) | 0.5 | 0.75 | 1 | 1.25 | 1.5 | 1.75 | 2 | 3 | 3.5 | 4 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nº Pasadas | 4-6 | 4-8 | 4-8 | 5-9 | 5-9 | 7.12 | 7.12 | 10-16 | 11-18 | 11-18 | 12-20 |

**P6**: Distancia de seguridad (en radios). Indica a que distancia, en el eje X, del punto inicial de la rosca se posiciona la herramienta en el movimiento de acercamiento. También es la distancia a la que se vuelve tras cada pasada de roscado.

**P7**: Pasada de acabado (en radios).

- Si es positiva, la pasada de acabado se realiza manteniendo el ángulo P12/2 con el eje X.
- Si es negativa, la pasada de acabado se realiza con entrada radial.
- Si es cero, se repite la pasada anterior, es decir, realizará una pasada de cepillado ayudando a dejar un mejor acabado en las paredes de los flancos.

**P10**: Paso de rosca en Z. Para la programación de roscas a derechas o a izquierdas se utilizará el sentido de giro del husillo con M03 y M04.

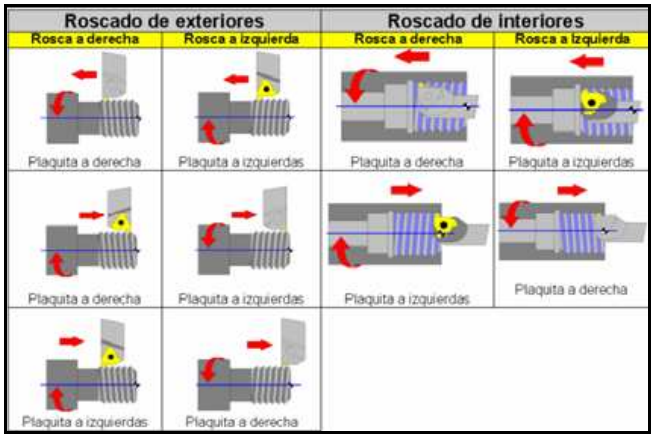



**Figura 90. Selección giro husillo según tipo de rosca.**

**P11**: Salida de rosca. Define a qué distancia del final de la rosca (punto B) según el eje Z comienza la salida de la misma:

- Positivo: el tramo CB' es una rosca cónica cuyo paso en Z es el definido en P10.
- Cero: el tramo CB' es perpendicular al eje Z y se realiza en G00.

**P12**: Ángulo de la herramienta. Las sucesivas pasadas formarán un ángulo P12/2 con el eje X. Los tipos de entrada son los siguientes:

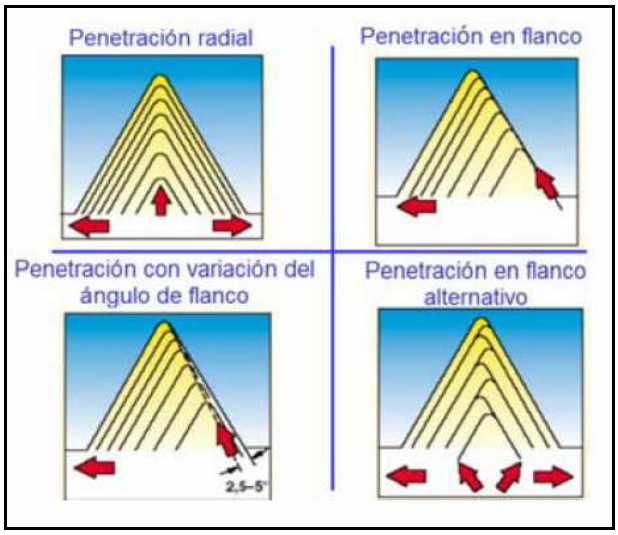



**Figura 91. Tipos de entrada en roscado.**

Comentarios.

- Las condiciones de mecanizado deben programarse antes de la llamada a este ciclo.
- Las condiciones de salida son G00 (mov. rápido), G07 (arista viva), G40 (sin compensación herramienta) y G90 (coord. absolutas).
- El ciclo comienza con un acercamiento rápido al punto de inicio A y finaliza en el mismo punto.
- Para realizar roscado cilíndrico o cónico se programa con las cotas de los puntos A y B.

## FUNCIONES AUXILIARES

Estas funciones sirven para seleccionar operaciones auxiliares con código numérico (parada, arranque del cabezal; activación del refrigerante..).

Nota: **no son universales**, pueden variar ligeramente de una máquina a otra.

**Tabla 4. Funciones Auxiliares en CNC.**

| Función | | Función | |
|---|---|---|---|
| **M00** | Parada programada | **M32** | Velocidad de corte constante |
| **M01** | Parada facultativa | M36 | Gama de velocidades de avance 1 |
| **M02** | Fin de programa | M37 | Gama de velocidades de avance 2 |
| **M03** | Rotación husillo sentido antitrigonométrico | M38 | Gama de velocidades de rotación 1 |
| **M04** | Rotación husillo sentido trigonométrico | M39 | Gama de velocidades de rotación 2 |
| **M05** | Parada del husillo | M40 | Cambio de velocidad |
| **M06** | Cambio de herramienta | M50 | Refrigeración 3 en marcha |
| **M07** | Refrigeración 1 en marcha | M51 | Refrigeración 4 en marcha |
| **M08** | Refrigeración 2 en marcha | M55 | Desplazamiento del origen de la herramienta 1 |
| **M09** | Parada de la refrigeración | M56 | Desplazamiento del origen de la herramienta 2 |
| M13 | Rotación del husillo antitrigonométrico y refrigeración | **M60** | Cambio de pieza |
| M14 | Rotación del husillo trigonométrico y refrigeración | M61 | Desplazamiento del origen de la pieza 1 |
| M15 | Desplazamiento en sentido positivo | M62 | Desplazamiento del origen de la pieza 2 |
| M16 | Desplazamiento en sentido negativo | **M68** | Sujeción de la pieza. |
| M19 | Parada del husillo con orientación determinada | **M69** | Suelta de la pieza |
| **M30** | Fin de cinta | M71 | Desplazamiento angular del origen de la pieza 1 |
| M31 | Suspensión de prohibición | M72 | Desplazamiento angular del origen de la pieza 2 |

Es imprescindible indicar el final del programa con la función auxiliar correspondiente (**M02** o **M30**). Con M02 se para el programa y el control se queda al final del programa. Con M30 se para el programa y se vuelve al principio.

Parada **M00** se para el programa y se reanuda cuando el operario lo indica a través del panel de control.

Parada **M01** se para el programa si el operario lo indica a través del panel de control.

Activación de giro del husillo **M03** (giro a derechas) o **M04** (giro a izquierdas).

Parada del giro del husillo **M05** o con **M30**.

Activación refrigerante/lubricante **M07** (lubricante principal); **M08** (lubricante secundario).

Parada refrigerante/lubricante **M09.**

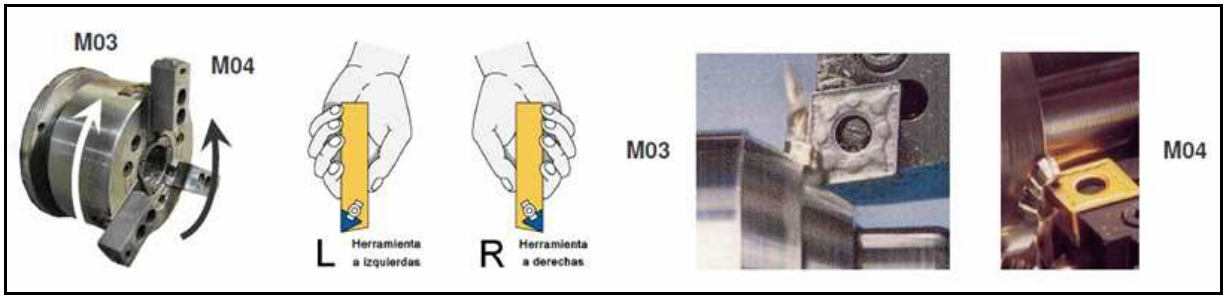



**Figura 92. Activación del giro del husillo en función de la posición del filo de corte.**

## 3.6 La fresadora CNC

En este apartado nos vamos a centrar en la programación de fresadoras CNC utilizando el código numérico ISO. Aunque, hoy en día se suele recurrir a la programación asistida por ordenador mediante programas CAD-CAM o a la programación conversacional mediante el uso de los paneles de control de las máquinas herramienta que facilitan este tipo de tareas, sin necesidad de conocer en profundidad el código numérico ISO. A pesar de esto, consideramos fundamental conocer la base de la programación en código ISO.

**Máquinas de Fresado (repaso)**

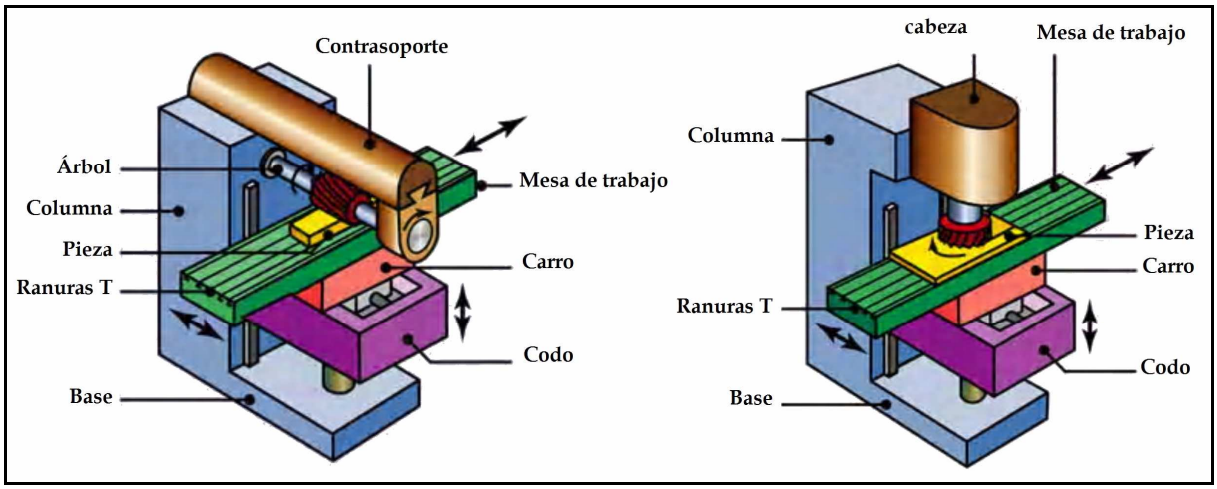



**Figura 93. Fresadora Horizontal (izq.). Fresadora Frontal o Vertical (dcha.).**

**Algunos conceptos a recordar:**

- **Fresado Cilíndrico [Fuente (2)].**
- **Fresado Frontal [Fuente (2)].**
- **Fresado convencional o en contraposición [Fuente (2)].**
- **Fresado en trepado o a favor [Fuente (2)].**

- **Tipos de fresas:** según el tipo de dentado (dientes fresados; dientes destalonados; dientes postizos); según el número de cortes (fresas de un corte; de dos cortes; de tres cortes); según su forma (cilíndricas; disco; cónicas; de forma; compuestas; madre); según su aplicación (fresas de planear; de ranurar: ranuras rectas, ranuras en T, ranuras con cola de milano, ranuras para chavetas o chavetero; fresas de cortar; fresas de perfilar o de forma; fresas para tallar engranajes: fresas módulo o fresas Madre).

### Operaciones en fresa (repaso)

En la siguiente figura se presentan las principales operaciones básicas a tener en cuenta en operaciones en fresado.

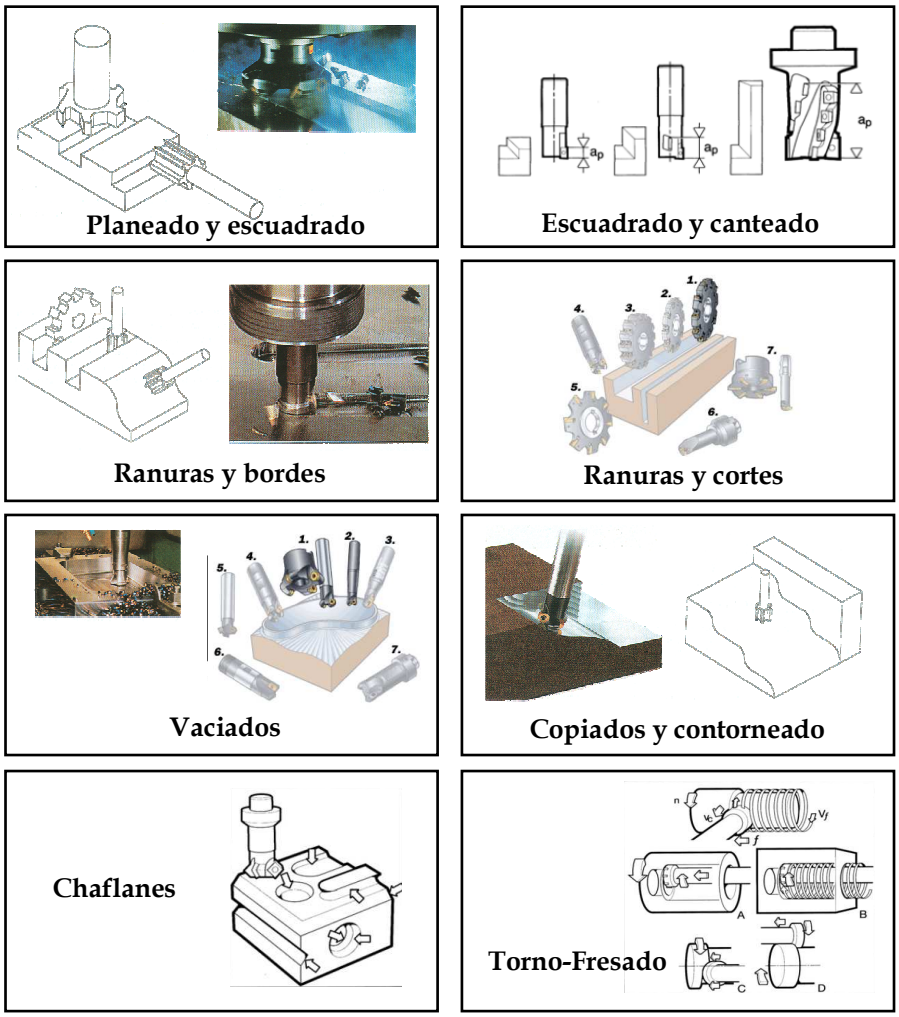



**Figura 94. Principales operaciones en fresa.**

### Sistemas de referencia

El **eje Z** suele referirse a la dirección del husillo principal (que aporta la potencia de corte); si no hay husillo principal el eje Z sería el perpendicular al plano de sujeción de la pieza (sentido positivo al alejarse de la pieza); en el caso de la fresa se denomina eje Z al eje del husillo que hace girar la herramienta de trabajo.

El **eje X** será perpendicular al eje Z y se elije sobre un plano paralelo a la superficie de sujeción de la pieza (mesa de trabajo). Su sentido positivo suele ser aquel en el que la herramienta se aleja de la pieza.

El **eje Y** será perpendicular al eje Z e incluido en el mismo plano con el eje X y perpendicular también a este.

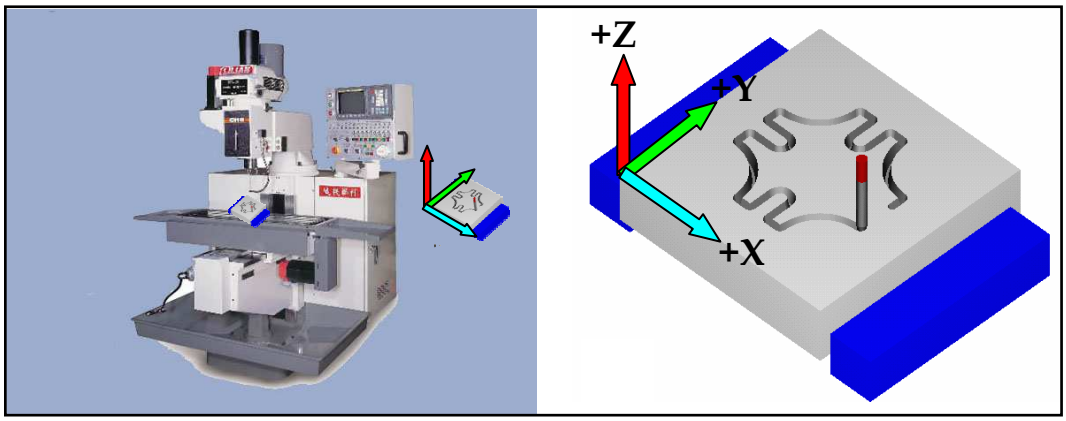



**Figura 95. Ejes en fresadora vertical.**

**Orígenes de referencia (Cero máquina – Cero pieza)**

- **Cero Máquina**: para fresadoras suele ubicarse en el vértice superior delantero izquierdo de la mesa de trabajo.
- **Cero Pieza (Cero Programa)**: punto con respecto al cual se suelen referenciar las coordenadas de las trayectorias establecidas en el código numérico de los programas. El cero pieza debe ser seleccionado por el operario antes de ejecutar cualquier programa (en **fresa**, generalmente se establece como cero pieza alguna de las esquinas de la pieza si es posible). El procedimiento para establecer el cero pieza puede variar según el tipo de fresa (modelo, fabricante).
- **Cero Herramienta**: en fresadoras suele ubicarse en el centro del husillo porta-herramientas, a la altura de la base de fijación.
- **Otros puntos de interés**:
    - **Puntos de referencia para los ejes**: es común que cada vez que se apaga y enciende cualquier fresadora sea necesario "inicializar los eje". Esta operación consiste en buscar unos puntos de referencia en la máquina en cada eje. Esta operación es necesaria en aquellas máquinas en los que los sensores de desplazamiento en los distintos ejes son incrementales (al apagar el panel de control se pierde la referencia del 0 en cada eje y es necesario realizar esta operación de inicializar los ejes).
    - **Home**: en fresa se puede definir o establecer un punto alejado de la pieza de trabajo donde reposa la herramienta antes de ejecutar un programa y hacia donde se retira una vez finalizado el trabajo. Aunque el controlador de la fresa no permita almacenar este punto como tal, si es recomendable fijarlo en el código numérico.
    - **Límites de seguridad**: se pueden establecer límites (X+, X-, Y+, Y, -Z+, Z-) que no puede sobrepasar la herramienta. Esto límites evitan que por erratas en el código numérico la herramienta pueda chocar con partes de la máquina.?¿?¿?¿

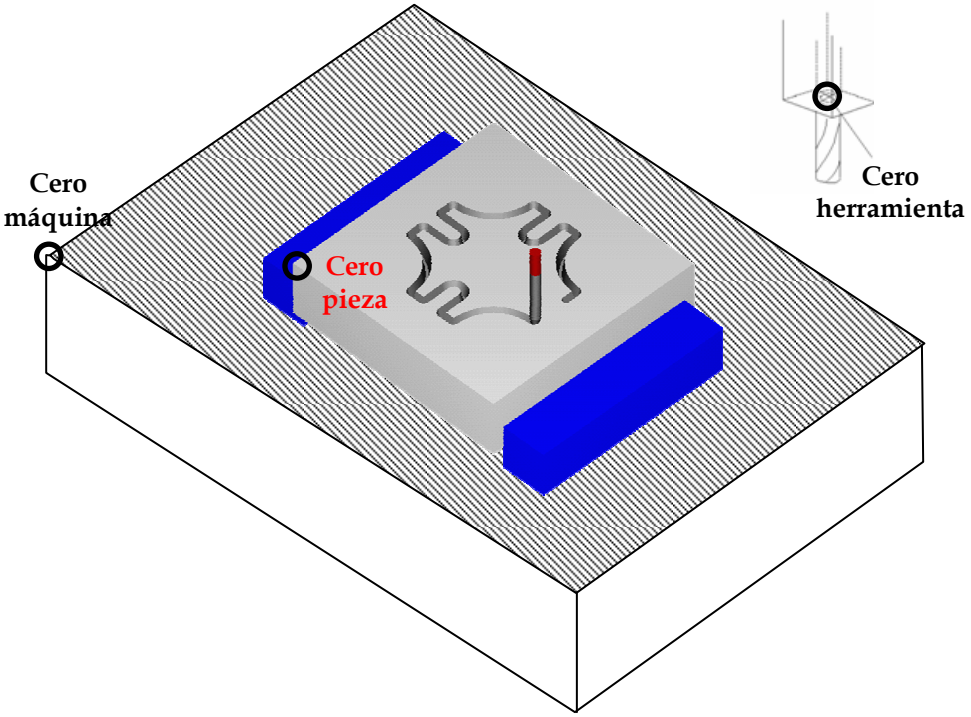



**Figura 96. Orígenes de referencia en fresadora frontal.**

### Compensación del radio de la herramienta de corte

La compensación de la herramienta en fresado parece más evidente que en torno. La trayectoria programada en un trabajo de fresado es la que sigue el centro de la herramienta, por lo que el valor que se debe corregir o compensar equivale a el radio de la fresa

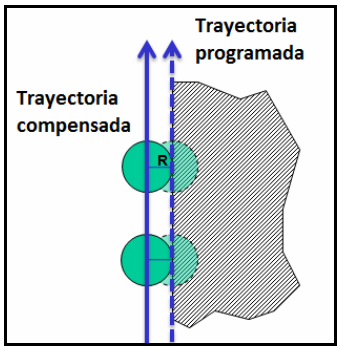



**Figura 97. Compensación del radio de herramienta en fresadora.**

En el caso de la fresa, las tablas con los datos de corrección de las herramientas contienen: el radio de la herramienta a utilizar en las compensaciones; el valor de desgaste del radio por tiempo de mecanizado; la longitud de la herramienta y el valor de desgaste en longitud.

Al igual que en torno, para activación de la compensación de la herramienta existen funciones específicas dentro del código numérico. Generalmente se utiliza G41 cuando la herramienta queda a la izquierda de la pieza en el sentido de la marcha y G42 cuando la herramienta queda a la derecha de la pieza en el sentido de la marcha.

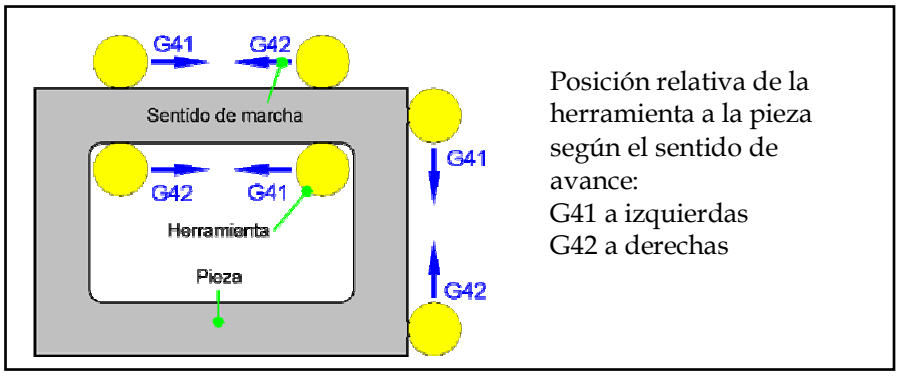



**Figura 98. Compensación a izquierdas o a derechas.**

### Código Numérico (Código ISO)

Salvo pequeñas diferencias; idem que en torno CNC

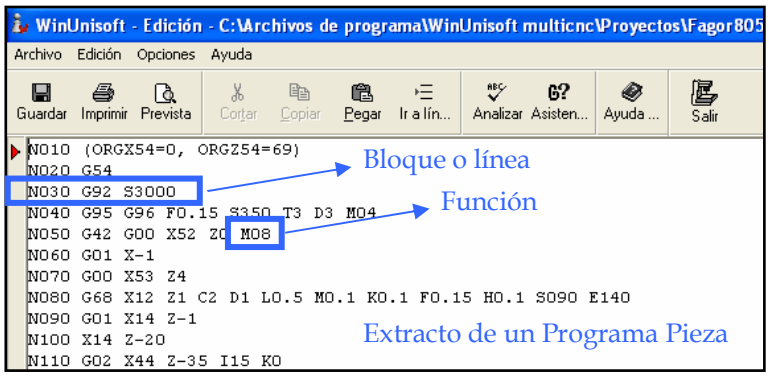



**Figura 99. Ejemplo de la estructura de un programa en Código ISO.**

El significado de las principales funciones expresadas por letras puede extraerse también de la **tabla 1**. Y el mismo significado para las **Funciones preparatorias de movimientos (G)**, **Funciones para el control de la velocidad de avance (F) y de la velocidad de giro del husillo principal (S), Función de herramientas (T) y Funciones auxiliares (M).** Ejemplo en **Fig. 46**.

**Función modal**: idem.

La programación en código ISO en fresadoras CNC es muy similar a la programación en tornos CNC (movimientos sencillos, programación de velocidades, selección de herramientas…). Las principales diferencias a destacar son:

- Cambio en el significado de las distintas funciones (G, M…) que dependerán del fabricante.
- Los ciclos fijos de mecanizado son diferentes.
- Se trabaja en X, Y, Z.

**PARA ESTUDIAR EL CÓDIGO NUMÉRICO EN OPERACIONES DE FRESADO SE REMITE AL ALUMNO AL DOCUMNETO "FI - Manual Fresadora SIEMENS.pdf" SECCIÓN 8 PÁGINA 8-101 HASTA EL FINAL DE LA SECCIÓN 9 PÁGINA 9-196.**

## Tabla 5. Funciones G para fresadora CNC (ojo, algunas cambian según el fabricante)

| Función | | Función | |
|---|---|---|---|
| G00 | Movimiento rápido sin corte | G58 | Selección del sistema 5 de coordenadas de trabajo |
| G01 | Interpolación lineal (avance de maquinado) | G59 | Selección del sistema 6 de coordenadas de trabajo |
| G02 | Interpolación circular en sentido antitrigonométrico (horario) | G60 | Posición en una sola dirección |
| G03 | Interpolación circular en sentido trigonométrico (anti-horario) | G61 | Para modo exacto |
| G04 | Parada temporizada | G62 | Sistema de control en modo automático en las esquinas |
| G09 | Parada Exacta | G63 | Modo de roscado |
| G10 | Colocar el cero del programa | G64 | Modo de corte |
| G11 | Cancelar modo cero del programa | G65 | Llamada de marcos |
| G17 | Seleccionar el plano XY | G66 | Esperar señal |
| G18 | Seleccionar el plano ZX | G67 | Esperar cancelación de señal |
| G19 | Seleccionar el plano YZ | G68 | Coordinar rotación |
| G20 | Entrada de datos en pulgadas | G69 | Cancelar coordinar rotación |
| G21 | Entrada de datos en milímetros | G73 | Avance rápido en el ciclo de perforado |
| G27 | Chequear el cero de la máquina o la posición de referencia (home) | G74 | Ciclo de perforado con velocidades de corte |
| G28 | Ir a la posición de referencia de la máquina (home) | G76 | Roscado |
| G29 | Regresar al punto de referencia | G80 | Cancela ciclo |
| G30 | Regresar al segundo punto de referencia | G81 | Ciclo de perforado sencillo |
| G31 | Saltar una función | G82 | Taladrado con tiempo de espera en el fondo |
| G33 | Roscado | G83 | Profundidad del agujero en el ciclo de perforado |
| G39 | Interpolación circular en esquinas | G84 | Ciclo de roscado |
| G40 | Cancelar compensación de corte | G85 | Ciclo para ampliar agujeros |
| G41 | Compensación de corte a izquierdas | G86 | Ciclo para ampliar agujeros |
| G42 | Compensación de corte a derechas | G87 | Regresar al ciclo para ampliar agujeros |
| G43 | Compensación en la longitud de la herramienta | G88 | Ciclo para ampliar agujeros |
| G44 | Compensación en la longitud de la herramienta | G89 | Ciclo para ampliar agujeros |
| G49 | Cancelar compensación en la longitud de la herramienta | G90 | Coordenadas absolutas |
| G50 | Cancelar escalado | G91 | Coordenadas incrementales |
| G51 | Escalado | G92 | Desplazamiento hasta el origen del sistema |
| G54 | Selección del sistema 1 de coordenadas de trabajo | G94 | Velocidad de avance en mm/min |
| G55 | Selección del sistema 2 de coordenadas de trabajo | G95 | Velocidad de avance en rev/min |
| G56 | Selección del sistema 3 de coordenadas de trabajo | G98 | Regresar al nivel inicial |
| G57 | Selección del sistema 4 de coordenadas de trabajo | G99 | Regresar al punto R (referencia) |

## Tabla 6. Funciones G para fresadora CNC (OTRO)

| Función | | Función | |
|---|---|---|---|
| **G00*** | Movimiento rápido sin corte | **G47** | Bloque único |
| **G01** | Interpolación lineal (avance de maquinado) | **G48*** | Anulación del Tratamiento de bloque único |
| **G02** | Interpolación circular en sentido antitrigonométrico (horario) | **G49** | Feed programable |
| **G03** | Interpolación circular en sentido trigonométrico (anti-horario) | **G50** | Carga de longitudes de herramienta |
| G04 | Temporización | **G53** | Traslado de origen |
| **G05*** | Arista matada | **G54** | Traslado de origen |
| G06 | Interpolación circular con centro en absolutas | **G55** | Traslado de origen |
| **G07*** | Arista viva | **G56** | Traslado de origen |
| G08 | Arco tangente a la trayectoria anterior | **G57** | Traslado de origen |
| G09 | Interpolación circular definida por tres puntos | **G58** | Traslado de origen |
| **G10*** | Anulación imagen espejo | **G59** | Traslado de origen |
| **G11** | Imagen espejo en eje X | **G70** | Programación en pulgadas |
| **G12** | Imagen espejo en eje Y | **G71** | Programación en milímetros |
| **G13** | Imagen espejo en eje Z | **G72** | Escalado definido por K |
| **G17*** | Seleccionar el plano XY | **G73** | Giro del sistema de coordenadas |
| **G18** | Seleccionar el plano ZX | G74 | Búsqueda del cero máquina |
| **G19** | Seleccionar el plano YZ | G75 | Trabajo con palpador |
| G20 | Llamada a subrutina estándar | G75 N2 | Ciclos fijos de palpación |
| G21 | Llamada a subrutina paramétrica | G76 | Creación automática de bloques |
| G22 | Definición de subrutina estándar | **G79** | Ciclo fijo definido por el usuario |
| G23 | Definición de subrutina paramétrica | **G80*** | Anulación de ciclos fijos |
| G24 | Final de definición de subrutina | **G81** | Ciclo fijo de taladrado |
| G25 | Llamada incondicional | **G82** | Ciclo fijo de taladrado con temporización |
| G26 | Llamada incondicional si igual a 0 | **G83** | Ciclo fijo de taladrado profundo |
| G27 | Llamada incondicional si distinto de 0 | **G84** | Ciclo fijo roscado con macho |
| G28 | Llamada incondicional si menor que | **G85** | Ciclo fijo de escarificado |
| G29 | Llamada incondicional si mayor o igual a | **G86** | Ciclo fijo de alisado con retroceso en G00 |
| G30 | Visualizar error definido por K | **G87** | Ciclo fijo de cajeado rectangular |
| G31 | Guardar origen de coordenadas | **G88** | Ciclo fijo de cajeado circular |
| G32 | Recuperar origen de coordenadas | **G89** | Ciclo fijo de alisado con retroceso en G01 |
| **G33** | Roscado electrónico | **G90*** | Programación de cotas absolutas |
| G36 | Redondeo controlado de aristas | **G91** | Programación de cotas incrementales |
| G37 | Entrada tangencial | G92 | Preselección de cotas |
| G38 | Salida tangencial | G93 | Coordenadas polares |
| G39 | Achaflanado | **G94*** | Avance F en mm/min |
| **G40*** | Anulación de compensación de radio | **G95** | Avance F en mm/rev |
| **G41** | Compensación de radio a izquierdas | **G96** | F constante |
| **G42** | Compensación de radio a derechas | **G97*** | F del tip constante |
| **G43** | Compensación de la longitud de la herramienta | **G98*** | Vuelta al plano de seguridad |
| **G44** | Anulación de compensación de la longitud de la herramienta | **G99*** | Vuelta al plano de referencia |

**En rojo y negrita: funciones modales**

***: opciones que por defecto toma el controlador en el momento del encendido.**

## 3.7 Máquinas de Corte CNC (Oxicorte)

Fundamento del corte por oxicorte **(ver manuales y documentos de las prácticas 2 y 3).**

Parámetros de corte en oxicorte **(ver manuales y documentos de las prácticas 2 y 3).**

Programación básica en oxicorte **(ver manuales y documentos de las prácticas 2 y 3).**

Manejo del panel de control **(ver manuales y documentos de las prácticas 2 y 3).**

Manejo del software de programación **(ver manuales y documentos de las prácticas 2 y 3).**

En este apartado vamos a estudiar el código numérico utilizado en máquinas de corte "ESAB CUTTING SYSTEMS", nos centraremos sobretodo en la máquina de oxicorte del laboratorio de fabricación. Algunos conceptos que veremos a continuación son comunes para otras tecnologías de corte con las que trabaja ESAB (corte por plasma, láser…).

**Sistemas de referencia**

Este tipo de máquinas de corte constan de un pórtico o carro porta-sopletes que se apoya en dos guías longitudinales. Los sopletes se desplazan transversalmente respecto de la mesa de trabajo a lo largo del pórtico porta-sopletes (eje Y). El carro porta-sopletes se desplaza a lo largo de las guías longitudinales (eje X).

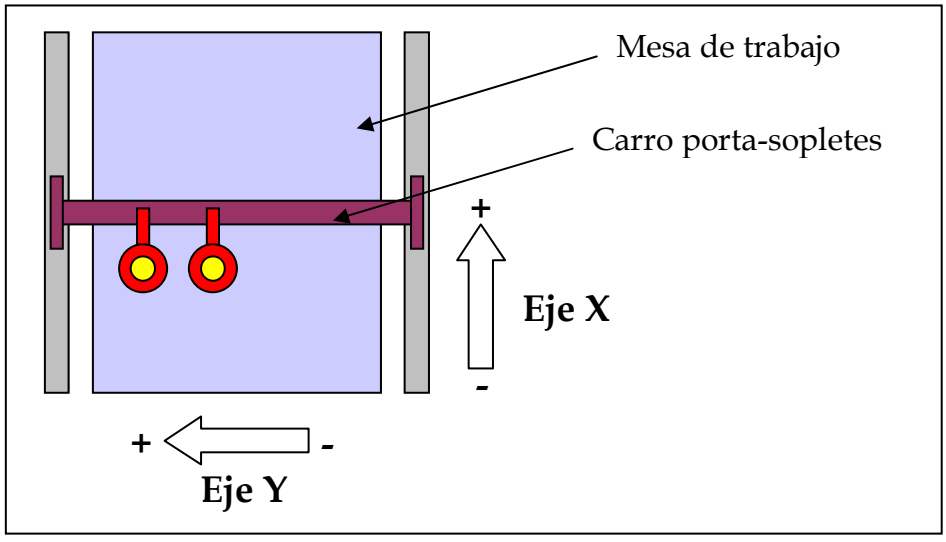



**Figura 100. Ejes en la máquina de oxicorte.**

El carro porta-sopletes puede tener uno, dos o más sopletes de corte, depende de las dimensiones de la máquina. Generalmente uno de los sopletes "maestro" es controlado a través del panel de control de forma manual o automática (programas en código numérico) y el resto de sopletes "esclavos" siguen los movimientos del primero mediante un sistema de engranajes, que permite sigan los movimientos del "maestro" de forma simétrica (espejo) (Fig. 101 dcha.) o realizar una copia de la trayectoria (Fig. 101 izq.).

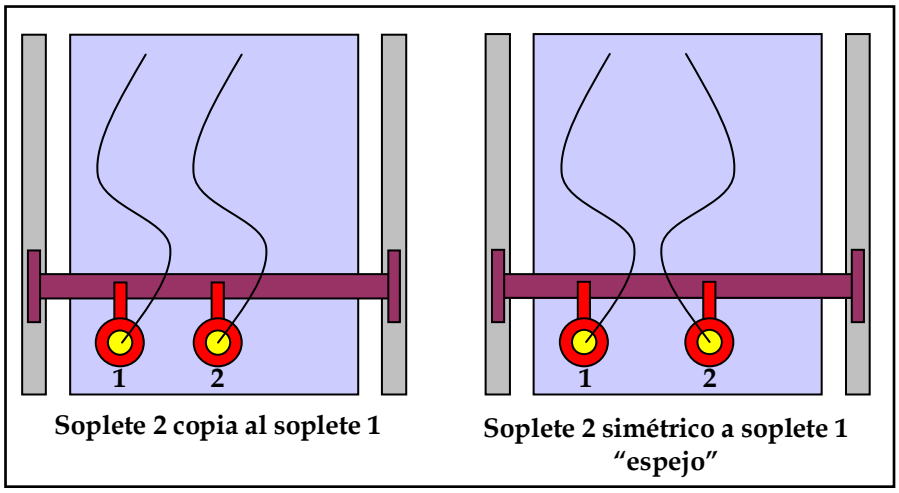



**Figura 101. Posibilidades de engranaje del soplete 2 "esclavo" respecto al soplete 1 "maestro" en la máquina de oxicorte.**

**Orígenes de referencia (Cero máquina – Cero programa)**

En este tipo de máquina podemos considerar dos puntos de referencia:

- **Cero Máquina**: es el punto que se toma como referencia para el desplazamiento del carro porta-sopletes en la mesa de trabajo. Generalmente el cero máquina suele situarse en la alguna de las esquinas de la mesa. En la máquina disponible en el laboratorio el Cero Máquina se sitúa en la esquina inferior izquierda según la Figura 102.
- **Cero Programa**: es el punto de inicio de cada programa de corte (varía de uno a otro). Suele hacerse coincidir con alguna de las esquinas del material (chapa) a cortar. Pueden darse varias situaciones:
    - **Trabajar en coordenadas absolutas respecto el Cero Máquina (hipotético):** si el código numérico de un programa de corte se expresase en coordenadas absolutas (respecto al cero máquina) el punto de inicio del programa quedará definido dentro del programa como un punto cualquiera dentro de la mesa de trabajo (depende del programa). A la hora de ejecutar el programa, el operario debería colocar el material a cortar en la posición correcta sobre la mesa de trabajo según las coordenadas establecidas en el programa (y generalmente orientado según los ejes de la máquina).
    - **Trabajar en coordenadas absolutas respecto el Cero Programa (hipotético):** fijamos el cero programa en alguna esquina de la chapa y todos los movimientos los programamos respecto el cero programa.
    - **Trabajar en coordenadas incrementales o relativas (nuestro caso):** el código numérico de los programas de corte se expresan en coordenadas relativas (más usual) fijando el cero programa en alguna esquina de la pieza de trabajo.
    - **Al fijar el Cero Programa en alguna esquina de la chapa:** en el momento de ejecutar un programa, el Cero Programa se corresponde con el punto en el que esté situado el soplete. Es decir, antes de ejecutar un programa el operario deberá colocar el material a cortar en la mesa de trabajo, da igual el lugar, sólo debe tener dos precauciones: que los lados de la chapa a cortar queden orientados según los ejes X e Y de la máquina y que la orientación de la chapa se corresponda con la orientación del programa de corte. Una vez colocado el material, se debe llevar el soplete a la esquina donde se haya situado el Cero Programa.

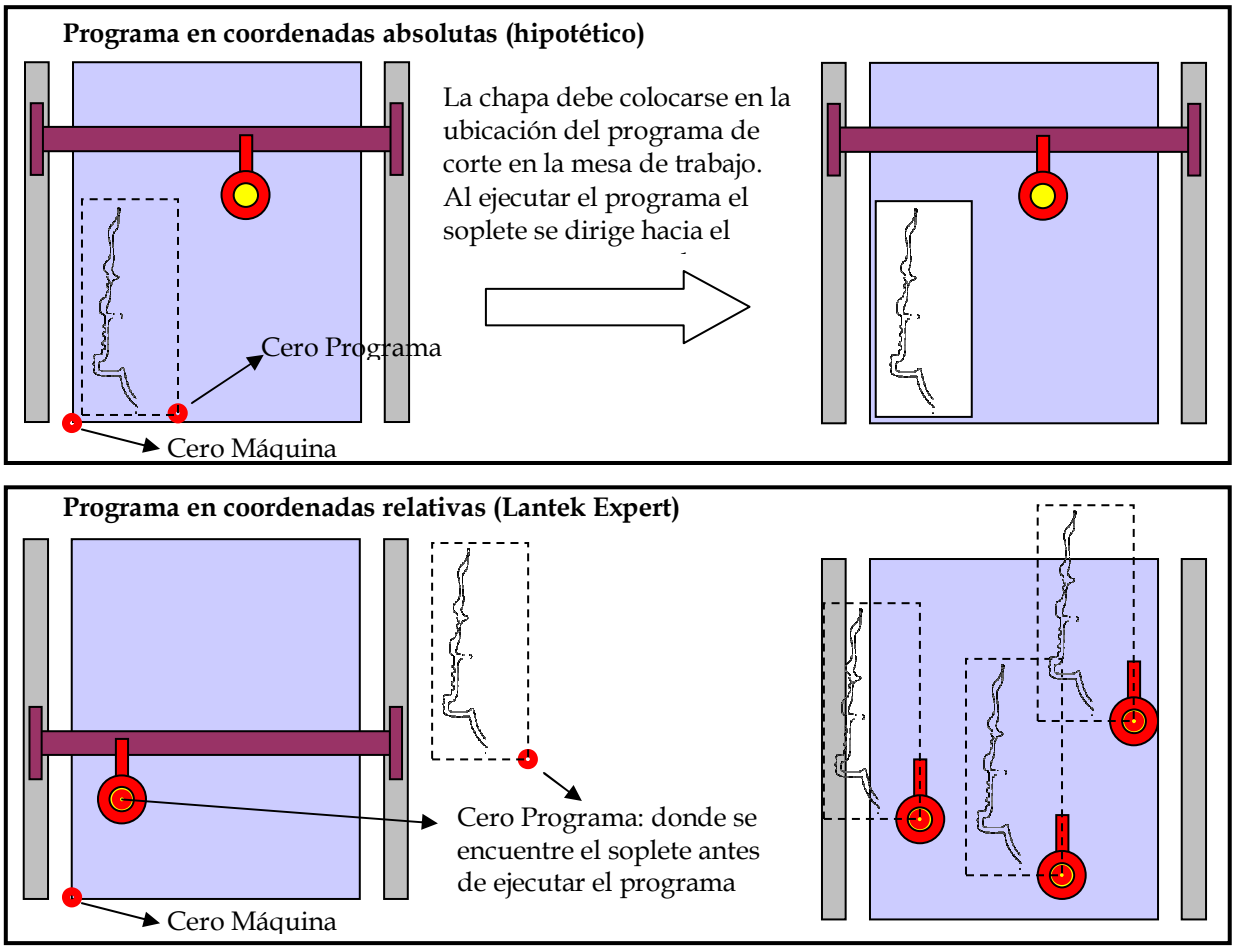



**Figura 102. Cero Máquina y Cero Programa en la máquina de oxicorte.**

**Sistemas de medida de la posición de los ejes**

El sistema de medida de la posición del soplete en los ejes X e Y es un sistema incremental, cuando la máquina se apaga pierde su referencia en los ejes. La primera acción que hay que ejecutar al encender el panel de control de la máquina es "referenciar los ejes". Es una operación que realiza automáticamente la máquina. Los puntos de referencia se encuentran próximos al Cero Máquina, la máquina encuentra estos puntos cuando dos topes ubicados sobre los ejes X e Y alcanzas dos "micros" o finales de carrera.

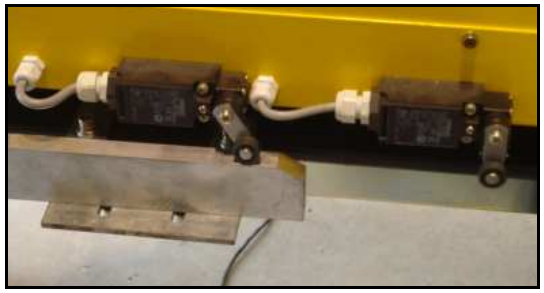


**Figura 103. Detalle de los finales de carrera en el eje X. Uno se corresponde con el punto de referencia y otro se corresponde con el límite de seguridad.**

**Limites de seguridad**: otros cuatro micros evitan que los sopletes se salgan de la mesa de trabajo, cuando los topes que hay en los carros (eje X e eje Y) tocan los micros de seguridad la máquina se desactiva.

**Compensación de la ranura de corte (Kerft)**

En oxicorte cuando se corta el material lo que realmente sucede es la combustión del hierro. Esta combustión provoca lo que se denomina "ranura de corte". El ancho de la ranura de corte dependerá de múltiples factores (espesor de la chapa, velocidad de corte, tipo de boquilla, regulación de los gases…). En el código numérico del programa de corte se deberán incorporar los comandos adecuados para realizar la compensación de la ranura de corte. Con esta compensación la trayectoria programada se desplaza hacia el exterior del contorno de corte una distancia igual a la mitad del valor de la ranura de corte (este valor se puede introducir en el panel de control de la máquina o a través del código numérico).

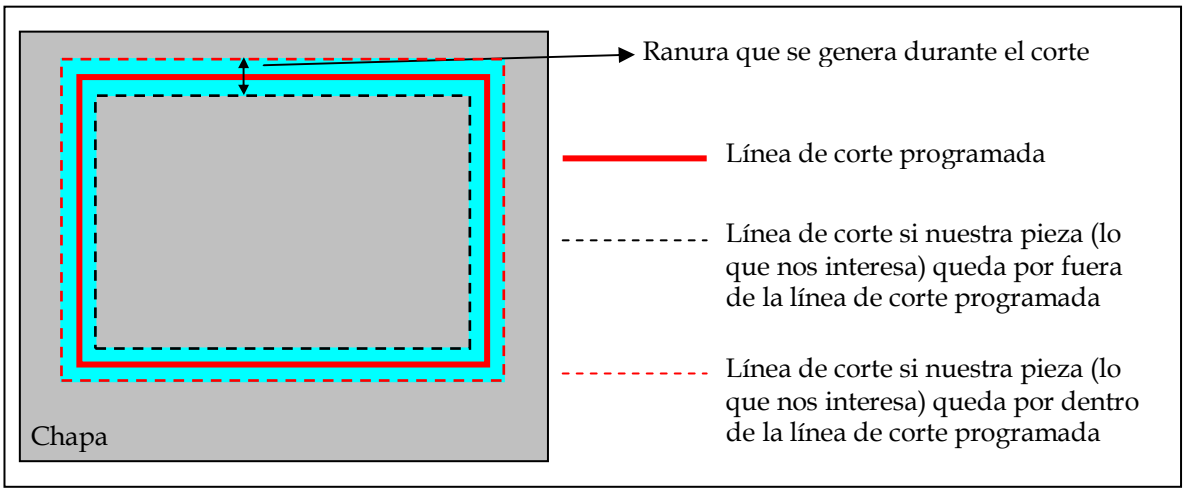



**Figura 104. Representación del desplazamiento del soplete en función de la ranura de corte.**

**Programar cotas en Oxicorte con Código Numérico**

Principalmente vamos a diferenciar entre la posibilidad de utilizar cotas **absolutas** o **incrementales**:

- **Cotas Absolutas (hipotético):** las coordenadas de los desplazamientos que debe seguir el soplete se establecen respecto al Cero Máquina. El Cero Programa quedará ubicado (fijo) en algún punto de la mesa de trabajo.
- **Cotas Absolutas:** las coordenadas que determinan los desplazamientos que debe seguir el soplete se establecen respecto al Cero Programa.
- **Cotas Incrementales:** las coordenadas que determinan los desplazamientos que debe seguir el soplete se establecen respecto a la posición del soplete en cada momento (respecto del punto que le preceda al movimiento que vamos a realizar).
- El **Cero Programa** se corresponde con la posición que ocupe el soplete justo antes de ejecutar el programa (que suele hacerse coincidir con alguna esquina de la pieza de trabajo).

**Programar movimientos En Oxicorte con Código numérico**

En la máquina de oxicorte podemos programar movimientos lineales (trayectorias rectas) y movimientos circulares (trayectorias circulares) en el plano XY. Por defecto las unidades se introducen en décimas de mm.

**Movimientos Lineales**

Para indicar un movimiento lineal se debe indicar las coordenadas del punto final (punto hacia donde nos queremos dirigir). Si alguna de las coordenadas no hace falta indicarla (valor 0), sólo sería necesario poner + o -.

**±X±Y**

Si queremos ir del punto A(10,10) al punto B(40,50) [en mm] indicaríamos:

- En coordenadas absolutas se indicaría: +400+500
- En coordenadas relativas se indicaría: +300+400

Si queremos ir del punto B(40,50) al punto A(10,10) sería:

- En coordenadas absolutas se indicaría: +100+100.
- En coordenadas relativas se indicaría: -300-400

**Movimientos Circulares**

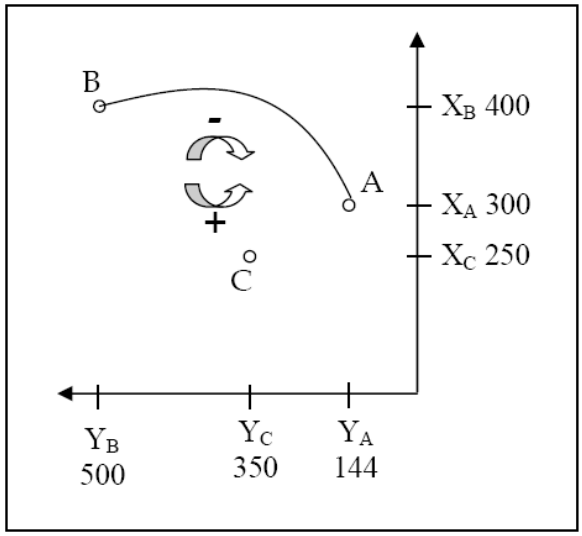
Para realizar un movimiento circular se indican las coordenadas del punto final (±X±Y) y el centro del arco que vamos a describir ($\pm X_c \pm Y_c$):

**$\pm X \pm Y \pm X_c \pm Y_c \pm$**

El signo que se indica al final del comando será + para indicar un movimiento anti-horario (en sentido contrario al de las agujas de un reloj) o – para indicar un movimiento en sentido horario.

En coordenadas absolutas, tanto las coordenadas del punto final como las coordenadas del centro del arco se refieren al origen (0,0) de la máquina (Cero máquina). En coordenadas relativas, las coordenadas se refieren al punto anterior.

Por ejemplo, si queremos ir de A(300,144) a B(400,500), describiendo un arco cuyo centro se encuentra en C(250,350) [en mm], tendríamos:




| | Absolutas | Incrementales |
|---|---|---|
| A → B | +400+500+250+350+ | +100+356-50+206+ |
| B → A | +300+144+250+350- | -100-356-150-150- |

**Figura 105. Varios ejemplos de la programación de movimientos circulares en la máquina de oxicorte.**

Para describir un círculo cerrado de 250 mm de radio (en incrementales) deberíamos escribir:

+++2500++ sería +0+0+2500+0+

+++2500+- sería +0+0+2500+0-

Describiríamos un círculo comenzando en el punto A y cerrándolo en el mismo punto, con el centro del círculo a +250 mm de distancia de A en el eje X.

**Código Numérico en Máquinas de Corte**

En la Tabla 7 se presenta el código numérico utilizado en máquinas de corte ESAB. En rojo se han marcado los comandos necesarios para realizar los programas de corte en nuestra máquina de oxicorte.

**Ejemplo de un archivo CNC para la máquina oxicorte**

| | |
|---|---|
| 3 | enciende el display |
| Pieza_banco | muestra el nombre del programa |
| 4 | apaga el display |
| 82 | desconecta coordenadas absolutas (trabaja en incrementales) |
| 39+800 | velocidad de corte igual a 800 mm/min |
| 5 | activa el movimiento rápido |
| +1177+9047 | se dirige desde el punto de inicio del programa (alguna esquina de la chapa) hasta el primer punto de precalentamiento. |
| 6 | desactiva el movimiento rápido |
| 29 | indica que la compensación (ranura) es a izquierdas |
| 7 | activa soplete (comienza un ciclo de corte) |
| +202-137 | \| |
| +898+807 | \| |
| +600+0+300+0+ | \| |
| +2059-1854 | \| movimientos del soplete durante el corte |
| +39+104 | \| |
| -4648+0 | \| |
| +1055+946 | \| |
| -33+38 | \| |
| 8 | desactiva soplete (finaliza el ciclo de corte) |
| 38 | desconecta la compensación a izquierdas |
| 63 | Finaliza el programa |

**Tabla 7. Funciones para máquinas de corte ESAB**

| Función | | Función | |
|---|---|---|---|
| **0** | STOP | **45** | Sensor de distancia (altura) chapa ON y función especial para láser |
| **3** | Activar comentario en Display | **46** | Sensor de distancia (altura) chapa OFF |
| **4** | Desactivar comentario en Display | **47** | Sensor de chapa ON |
| **5** | Activar velocidad rápida (sin corte) | **48** | Sensor de chapa OFF |
| **6** | Desactivar velocidad rápida (sin corte) | **51** | Control tangencial ON |
| **7** | Activar ciclo de corte | **52** | Control tangencial OFF |
| **8** | Desactivar ciclo de corte | **53** | Ciclo de corte por plasma ON |
| **9** | Aire comprimido de marcado ON (o polvo o plasma de marcado ON) | **54** | Ciclo de corte por plasma OFF |
| **10** | Aire comprimido de marcado OFF (o polvo o plasma de marcado OFF) | **55** | Tiempo de precalentamiento 2 ON; refrigeración en esquina para láser |
| **10+3nnnww** | Llamar macro mpg | **56** | Entrada con precalentamiento en punto de ataque ON / Entrada por borde OFF |
| **11** | Compensación del primer marcado (aire comprimido) ON | **57** | Entrada por borde ON / Entrada con precalentamiento en punto de ataque OFF |
| **11+n** | Marcado compensación 1-16 | **58** | Preselección del segundo proceso de plasma |
| **12** | Herramienta de marcado compensación OFF | **59** | Preselección del primer proceso de plasma |
| **13** | Soplete lateral ON | **61** | Origen máquina en la zona operativa activo |
| **16** | Soplete lateral OFF | **61+…** | Origen de las zonas activas de trabajo |
| **21** | Giro 90º | **62** | Programa de origen |
| **28** | Espejo 90º | **62+** | Aproximación a puntos dentro de un programa |
| **29** | Activar compensación de ranura de corte a izquierdas | **63** | Reset / Fin de programa |
| **30** | Activar compensación de ranura de corte a derechas | **64** | Reset / Fin de programa |
| **31** | Estación preseleccionada 1-9 ON | **65** | Ir al Cero máquina en Eje x |
| **31+…+…** | Estación de sujeción 1-9 ON | **66+n** | Llevar la estación de trabajo a la posición HOME (n indica el número de estación) |
| **32** | Estación preseleccionada 1-9 OFF | **67** | Ir al Cero máquina en Eje y |
| **33** | Estación preseleccionada 10-12 ON | **70** | Tabla de cambios START |
| **33+…+…** | Estación de sujeción 10-12 ON | **72** | Puntero láser ON |
| **34** | Estación preseleccionada 10-12 OFF | **73** | Iniciar la ignición en plasma |
| **35** | Ciclo de chorro de arena/abrasivo ON | **74** | Ignición en plasma OFF |
| **36** | Ciclo de chorro de arena/abrasivo OFF | **76** | Preseleccionar altura de chapa para el sensor de chapa |
| **37+n+xxxxx** | posicionamiento de la estación con sujeción neumática | **77** | Preseleccionar altura de chapa por arco |
| **37+n+xxxxx** | posicionamiento de la estación con carros | **78** | Contorno pequeño (láser) |
| **38** | Desactivar compensación de ranura de corte | **79** | Contorno grande (láser) |
| **39+…** | Velocidad de corte programada | **81** | Coordenadas absolutas ON |
| **40+…** | Valor de la ranura de corte | **82** | Coordenadas absolutas OFF (relativas ON) |
| **41+…** | Tiempo de espera | **84** | Medidas en mm |
| **42** | Precalentamiento On | **85** | Medidas en pulgadas |
| **42+…+…** | Precalentamiento automático con entrada por el canto de la chapa | **86+…+…** | Origen relativo |
| **43** | Oxígeno de corte OFF /Láser OFF | **88** | Origen relativo OFF / Origen absoluto ON |
| **44** | Selección del punto de entrada / entrada láser por el canto de la chapa | **90** | Inicio de línea |

**Tabla 7. Funciones para máquinas de corte ESAB (continuación)**

| Función | | Función | |
|---|---|---|---|
| **91** | Fin de línea | **155+---** | Parámetro del proceso |
| **100** | Grabar borrado ON por selección | **156+---** | Parámetro del proceso |
| **101** | Grabar borrado OFF por selección | **157+---** | Parámetro del proceso |
| **102** | STOP del programa (por selección) | **158+---** | Parámetro del proceso |
| **110** | Potencia de marcado / marcado por plasma / marcado por láser ON | **159+---** | Parámetro del proceso |
| **111** | Potencia de marcado / marcado por plasma / marcado por láser OFF | **160+---** | Parámetro del proceso |
| **114** | Compensación del segundo marcado ON | **161+---** | Parámetro del proceso / Intensidad del plasma (amperios) |
| **117** | Control tangencial – el ángulo previo prevalece | **162+---** | Parámetro del proceso |
| **118** | Plasma VBA rutina de esquina | **163+---** | Parámetro del proceso /Voltaje (V) |
| **120+…** | Altura del plasma VBA izquierdo | **164** | Nivel de agua (centro) |
| **121+…** | Altura del plasma VBA derecho | **165** | Nivel de agua (bajo) |
| **122** | Angulo de interpolación final para varios registros (sólo para plasma) | **166** | Nivel de agua (alto) |
| **122+…** | Ajustar el ángulo del plasma VBA izquierdo o el ángulo del chaflán de corte | **167+---** | Parámetro del proceso |
| **122+w+1** | Iniciar ángulo de interpolación sobre todos los registros (sólo para plasma) | **168+---** | Parámetro del proceso |
| **123+…** | Ajustar el ángulo del plasma VBA derecho | **169+---** | Parámetro del proceso |
| **129+…** | Espesor del material | **205** | Marcado con tinta ON |
| **141** | Iniciar ángulo – e interpolación lateral sobre todos los registros. | **206** | Etiquetado con tinta ON |
| **141+…** | Iniciar altura de calibración (sólo para láser VBA) | | |
| **142** | Fin ángulo – e interpolación lateral sobre todos los registros. | **207+aaabbbcd.SDP** | Llamada a datos de parámetros de corte para láser |
| **142+…** | Iniciar ángulo de calibración (sólo para láser VBA) | | |
| **143** | Iniciar medida de radio (sólo láser VBA) | **207+cbbaa.SDP** | Llamada a datos de parámetros de corte para plasma |
| **150** | Preseleccionar proceso autógeno | **207+aaa.MPG** | Llamar macro MPG |
| **151+---** | Parámetro del proceso | **223+…** | Sistema de etiquetado |
| **152+---** | Parámetro del proceso | **224** | Texto de etiquetado |
| **153+---** | Parámetro del proceso | **225+…** | Altura de etiquetado |
| **154+---** | Parámetro del proceso | **226+…** | Ángulo de etiquetado |

**Programación Conversacional en la máquina de oxicorte**

Siguiendo el menú interactivo del panel de control de la máquina de oxicorte el usuario puede programar ciertas geometrías de corte siguiendo. Estas geometrías de corte han sido seleccionadas por el fabricante después de realizar un estudio de las necesidades de sus clientes.

Para realizar la programación con estos módulos hay que realizar 4 operaciones:

- Seleccionar la geometría.
- Seleccionar el tipo de corte (oxicorte, plasma, láser… depende de la máquina).
- Definir las dimensiones de la geometría.
- Definir los puntos de ataque (entrada) y salidas del contorno.

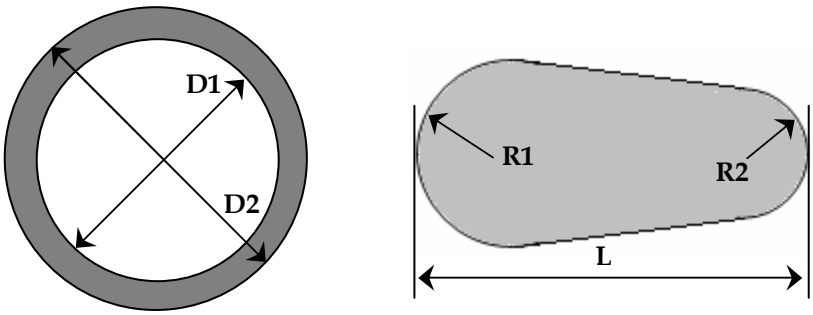



**Figura 106. Ejemplo de módulos o plantillas para programas de corte en la máquina de oxicorte.**

## 3.8 Programación en tornos CNC con lenguaje avanzado

El código base para la programación de máquinas herramientas es el código ISO o código G. Como ya hemos visto anteriormente este código puede sufrir pequeñas variaciones dependiendo el tipo de máquina (modelo, fabricante); aunque los conceptos generales y el modo de programación son muy similares.

En algunos casos, este tipo de máquinas-herramienta permiten otro modo de programación, bien a través del panel de control o bien a través de un ordenador auxiliar con algún programa especial.

Este modo de programación ha sido introducida previamente como **Programación Conversacional**, la programación se realiza de forma interactiva, el operario debe segur una serie de menús en el panel de control (u ordenador), va introduciendo los diferentes parámetros y ciclos de corte; puede realizar una visualización o simulación del programa realizado y una verificación in-situ del programa.

Como ejemplo de esta forma de programación se remite al alumno al documento **"FI - Manual Torno CNC ProtoTRAK® SLX CNC.pdf"** que se podrá estudiar un poco más en profundidad durante las prácticas 4 y 5.

# 4 TEMA 4: PROGRAMACIÓN DE MÁQUINAS-HERRAMIENTA MEDIANTE SIMULADORES Y PROGRAMAS CAD/CAM

## 4.1 Introducción

En el tema anterior se ha hablado del manejo y programación de máquinas herramienta CNC, este tipo de tecnología nos permite a través de líneas de código alfa-numéricas controlar todos los movimientos y operaciones de estas máquinas.

En el caso concreto del torno y de la fresadora se han visto dos posibilidades de programación mediante CNC: (i) una programación directa o manual, en la que el usuario debe ir escribiendo el código numérico línea a línea; (ii) una programación conversacional, con código avanzado, en el que el operario va completando una serie de menús interactivos en el ordenador de la máquina-herramienta.

En este tema vamos a ver otras dos posibilidades de programar máquinas-herramienta CNC que facilitan la labor al operario:

- **Simuladores CNC**: se trata de programas de ordenador de edición y simulación de programas en código numérico para tornos y fresadoras (principalmente). En este tipo de programas el usuario puede editar el código numérico del programa de corte que necesite. Aunque la edición del programa CNC se realice de forma manual, el usuario puede acceder a un menú de ayuda con información sobre todos los comandos y funciones del código numérico. Una vez editado el programa, este tipo de simuladores permiten hacer una simulación y puesta a punto del código numérico en el ordenador, sin necesidad de hacerlo de forma directa sobre la máquina. Para realizar la simulación del código numérico, el programa nos permite introducir las características del bruto, el tipo de herramientas y otros parámetros necesarios.

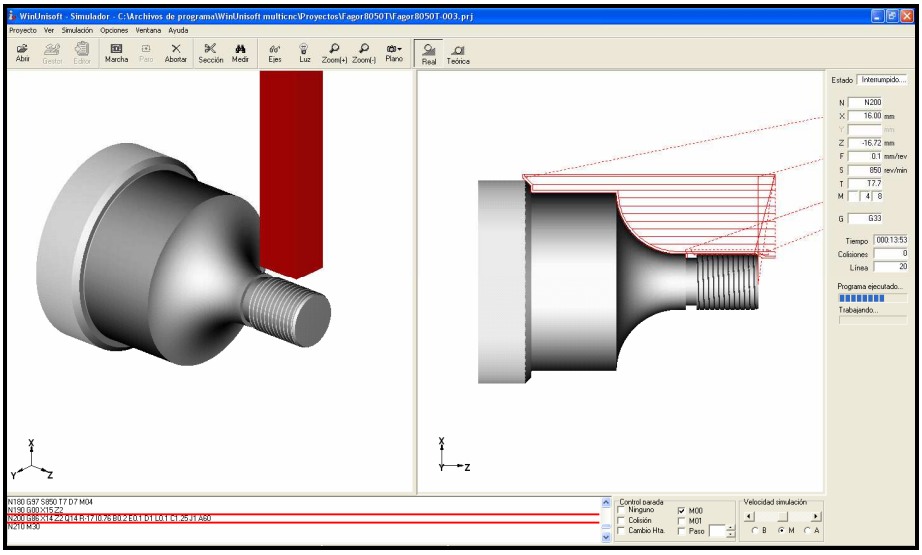



**Figura 107. Simulador WinUnisoft.**

- **Programas CAD/CAM**: esta opción nos permite dar un paso más en la programación de máquinas-herramientas CNC. Hasta ahora el usuario a partir de la geometría de la pieza a obtener debía editar/escribir el código numérico. Con este tipo de programas CAD/CAM

el usuario, a partir del diseño de la pieza a mecanizar realizado en programas de diseño *CAD* (*Diseño Asistido por Ordenador*; por ejemplo SolidWorks), puede obtener de forma rápida y sencilla el código numérico mediante el uso de programas *CAM* (*Manufactura asistida por ordenador*; por ejemplo el complemento SolidCAM para SolidWorks).

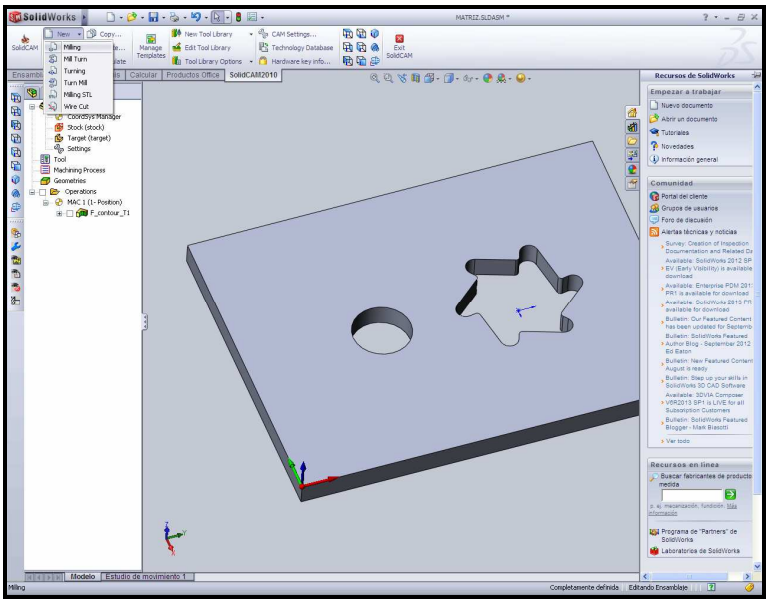


**Figura 108. SolidWorks con el complemento SolidCAM.**

Los contenidos de este tema son:

- Ingeniería y Diseño Asistido por Ordenador.

- Fabricación Asistida por Ordenador (CAM).

- Programación de máquinas-herramienta mediante simuladores. WinUnisoft.

- Programación de máquinas-herramienta mediante programas CAD-CAM. SolidWorks y SolidCAM.

## 4.2 Ingeniería y Diseño Asistido por Ordenador

El Diseño Asistido por ordenador (CAD) abarca el uso de los ordenadores para la obtención de planos (2D) y modelos (3D) del diseño de productos. En general el diseño asistido por ordenador se asocia a gráficos interactivos (sistemas CAD). Los sistemas de diseño asistido por ordenador son herramientas muy potentes y útiles para el diseño geométrico de piezas, componentes, productos… Como ejemplo de una herramienta podemos citar los programas AutoCAD y el programa SolidWorks; el primero es suele utilizarse para el diseño 2D, y el segundo para el diseño de piezas (sólidos) en 3D. En cualquier caso, ambas herramientas permiten el diseño en 2D y 3D.

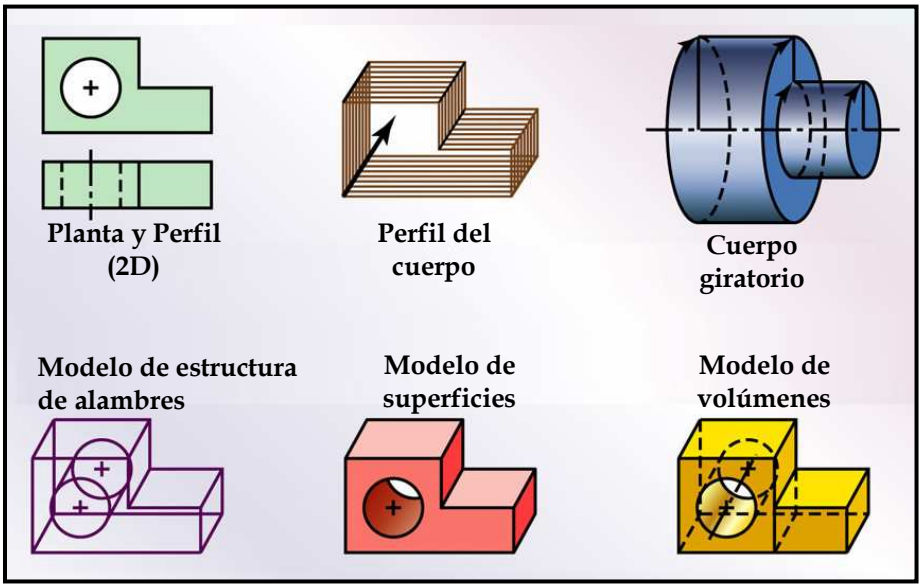



**Figura 109. Tipos de modelado con herramientas CAD. (Fuente [1])**

Programas **CATIA (Aplicaciones interactivas tridimensionales asistidas por ordenador)**: estos programas permiten que el diseño CAD pueda ser sometido a análisis de ingeniería y detectar problemas futuros (exceso de carga, deflexión…). También podemos almacenar en la base de datos CAD información como listas de materiales, especificaciones de fabricación… Con toda esta información se pueden realizar análisis económicos y proponer diseños alternativos.

**Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE)**: permite el intercambio de información entre diferentes aplicaciones:

- Análisis de esfuerzos, deformaciones, deflexiones, distribución de temperatura mediante elementos finitos.
- Generación de CNC.
- Diseño de circuitos integrados y dispositivos electrónicos.

**Formatos de los archivos**: dada la gran diversidad de programas CAD y CAM es necesario que el formato de los archivos, que se obtengan con cada programa, permita el intercambio de información entre estos. Algunos de los formatos de archivos son:

- **DXF**: formato para el intercambio de planos, apareció inicialmente para *Autodesk (AutoCAD)* siendo estándar para la mayoría de programas. Sólo incluye información de la geometría.
- **STL** (estereolitografía): se utiliza para exportar geometrías tridimensionales, surgió para sistemas de prototipado rápido. Se puede utilizar para el intercambio de información entre programas CAD.
- **Formatos IGES** (Especificación Inicial de Intercambio de Gráficas o Representación Digital para la Comunicación de Productos de Definición de Datos): formato simple y neutral. Además de incluir información sobre la geometría permite incluir otro tipo de información. Formato en evolución, existen muchas variantes. El usuario puede intercambiar información de cualquier modelo (esquemas, superficies, representaciones sólidas).
- **Formatos PDES** (Especificación de Intercambio de Datos de Productos): se basa en el Estándar para el Intercambio de Datos del Modelo de Productos (**STEP**), estándar desarrollado por la ISO (International Standards Organization u Organización Internacional de Normalización). Este tipo de formato permite transferir información sobre la forma, diseño, fabricación, calidad, pruebas, mantenimiento… entre diferentes herramientas CAD.

**Lectura recomendada sobre los formatos neutros en CAD ("FI - Del Río Cidoncha *et al*.pdf")**

El diseño en programas CAD se puede resumir en cuatro etapas:

- **1. Modelado Geométrico**: con este modelado un cuerpo físico queda descrito matemática o analíticamente. El usuario debe introducir la información del modelo geométrico creando líneas, superficies, sólidos, dimensiones y texto. Con toda esta información se representa de forma precisa el objeto (en 2D o 3D). El modelo del objeto se representa gráficamente en el espacio de trabajo y los datos se almacenan en la base de datos correspondiente. Los modelos en un sistema CAD se pueden representar principalmente de tres maneras:
  - **Estructura de alambres (lineal)**: se representan los bordes del modelo como líneas sólidas. Para formas complejas esta opción puede resultar confusa, aunque permite el uso de diferentes colores (por ejemplo el uso de capas en AutoCAD).
  - **Modelo de superficies**: con esta opción se representan todas las superficies visibles del modelo. Quedan definidos los rasgos superficiales y los bordes de los objetos.
  - **Modelo de sólidos**: al igual que la opción anterior quedan representadas todas las superficies visibles del modelo, pero además se aportan datos del volumen interior (tipo de material…).

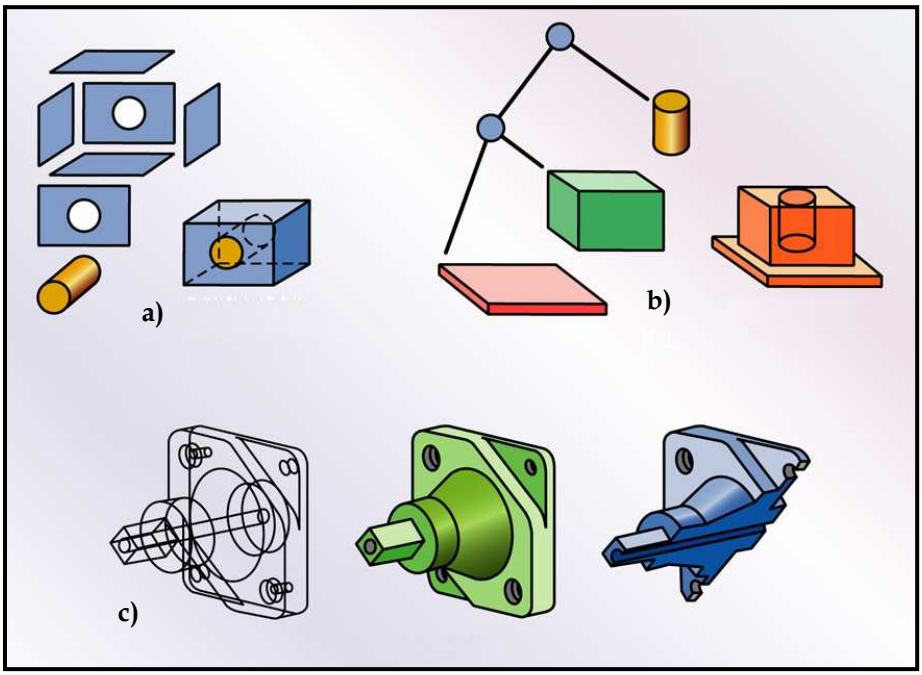



**Figura 110. Límites de un sólido con las superficies envolventes del modelo (a); Modelo de un sólido obtenido como composición de sólidos primitivos (b); Tres representaciones de un modelo en CAD. (Fuente [1])**

- **2. Análisis y optimización del diseño**: una vez obtenido el modelo geométrico se puede realizar un análisis de ingeniería (examinar esfuerzos, deformaciones, vibraciones, transferencia de calor, distribución de temperaturas, tolerancias dimensionales…). Por ejemplo, el análisis mediante elementos finitos.

- **3. Revisión y evaluación de diseños**: en esta etapa se plantea el objetivo de verificar cualquier interferencia entre diferentes componentes de un diseño (evitar dificultades durante el ensamblado de los componentes, evaluar el comportamiento de partes móviles). Para esta etapa se pueden utilizar programas con capacidad para realizar animaciones de los diseños (identificar problemas en elementos móviles) y/o análisis dinámicos de los diseños.

- **4. Documentación y proyectos**: en esta etapa se obtienen planos detallados de los diseños.

## 4.3 Fabricación Asistida por Ordenador (CAM)

A menudo se combina el Diseño Asistido por Ordenador (CAD) con la Fabricación Asistida por Ordenador (CAM) dando lugar a los denominados sistemas **CAD/CAM**. Esta combinación permite transferir información desde la etapa de diseño hasta la etapa de fabricación. En el caso concreto que se va a tratar en este tema, los sistemas CAD/CAM permiten, a partir de la información geométrica del diseño de una pieza, obtener el código numérico para el control de máquinas-herramienta CNC (Tornos, fresadoras…) sin necesidad de tener que editar el CN de forma manual.

La CAM almacena y procesa la información desarrollada u obtenida durante el diseño en CAD, obteniendo los datos e instrucciones necesarios para el control y manejo de la maquinaria de producción.

Una característica muy importante de los sistemas CAD/CAM es su gran capacidad para obtener y describir las trayectorias de las herramientas a partir del diseño de una pieza en CAD.

Algunas aplicaciones de los sistemas CAD/CAM:

- Programación de control numérico.
- Programación de robots industriales.
- Diseño de matrices y moldes para fundición.
- Diseño de matrices complejas para conformado de chapa metálica, matrices de estampado.
- Diseño de herramientas.
- Control de calidad e inspección.
- Planificación y programación de procesos.
- Distribución en planta.

## 4.4 Programación de máquinas-herramienta mediante simuladores. WinUnisoft

En este apartado se va a realizar una breve descripción sobre el uso del editor y simulador WinUnisoft.

WinUnisoft es un programa que permite la edición de programas en control numérico para tornos CNC y fresadoras CNC. Una vez editados lo programas y definidos todos los parámetros necesarios (máquina, bruto, herramientas…) el programa permite realizar una simulación del mecanizado. Este simulador permite realizar la puesta a punto de un programa de corte previa a la puesta a punto definitiva de forma directa sobre la máquina-herramienta.

**Para más información a cerca del funcionamiento de WinUnisoft se remite al alumno al documento "FI - Manual WinUnisoft.pdf".**

A continuación veremos sobre un ejemplo realizado en WinUnisoft todos los pasos a seguir para editar un programa en CN. Primero ejecutamos el programa.

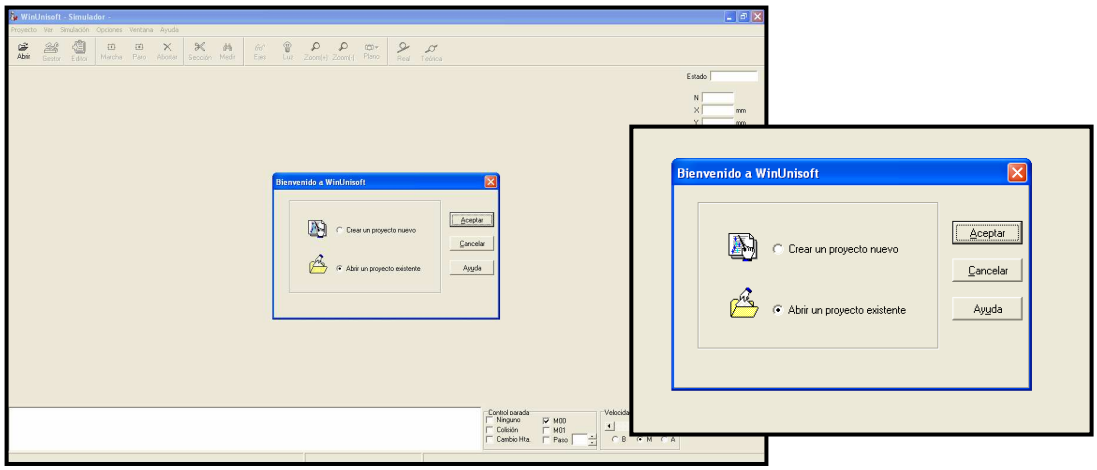



**Figura 111. Simulador WinUnisoft; Crear o abrir proyecto.**

En este caso seleccionaremos la opción abrir un proyecto existente para torno FAGOR 8025T. En la siguiente figura se muestra la apariencia inicial del simulador WinUnisoft una vez abierto el proyecto existente "FAGOR 8025T-003.prj".

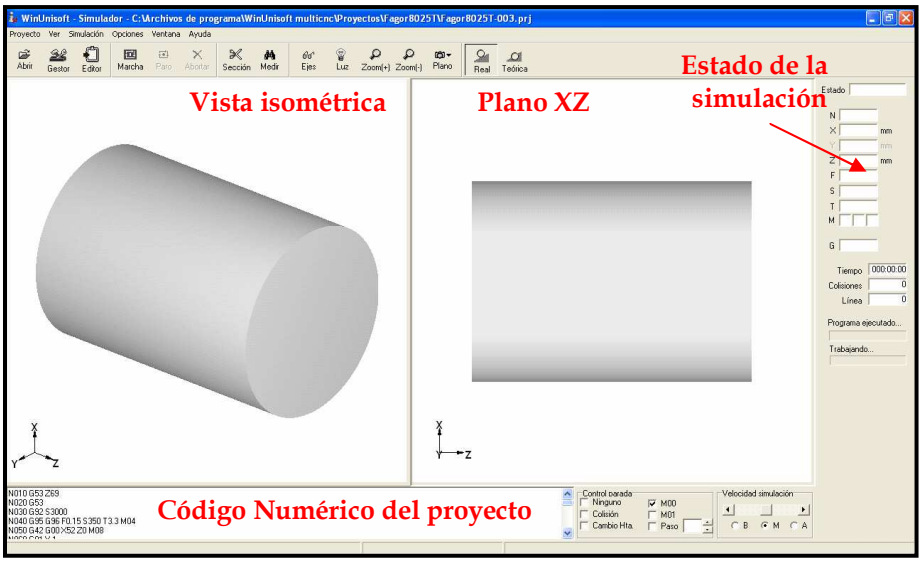



**Figura 112. Apariencia principal del Simulador WinUnisoft.**

En el menú de la parte superior de la ventana tenemos las dos opciones principales que podemos considerar:

- **Gestor**: se abre una nueva ventana donde podemos gestionar todos los datos y parámetros del proyecto.
- **Editor**: se abre una nueva ventana de edición del código numérico del proyecto.
- **Marcha**: con este icono activamos la simulación del mecanizado.

## GESTOR DE PROYECTOS

Al seleccionar la opción gestor se nos abre la siguiente ventana:

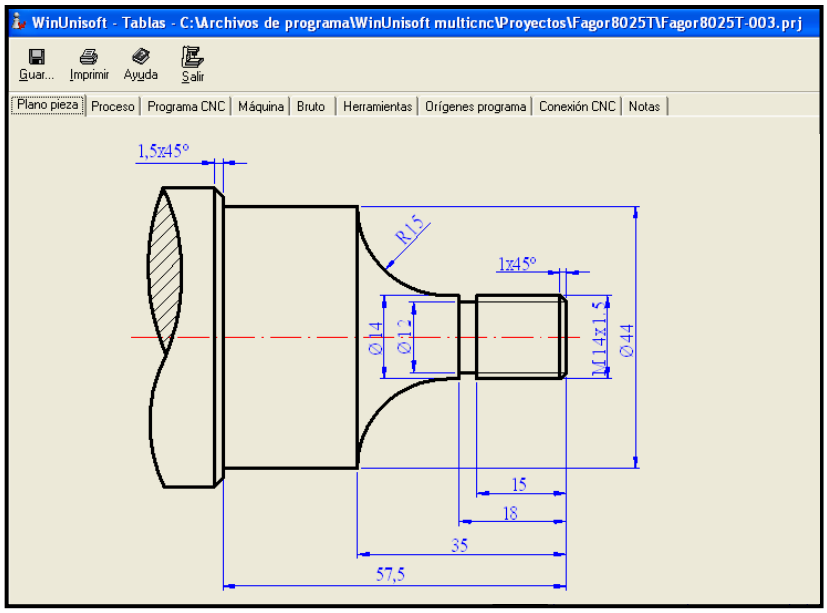



**Figura 113. Gestor de proyectos en el Simulador WinUnisoft.**

Dentro del gestor de proyectos nos encontramos con las siguientes pestañas:

- **Plano Pieza**: nos muestra un plano con las dimensiones y cotas de la pieza de trabajo a obtener tras el mecanizado.
- **Proceso**: nos da la opción de obtener el proceso del mecanizado en PDF **(ver archivo "FI - Ejemplo Proceso Mecanizado Proyecto WinUnisoft.pdf")**.
- **Programa CNC**: en esta ventana podemos ver (pero no editar) el código numérico del proyecto.
- **Máquina**: en esta ventana podemos elegir el tipo de máquina (torno o fresadora), el tipo de control numérico, y parámetros relacionados con el espacio de trabajo de la máquina, las herramientas, velocidades y programación.
- **Bruto**: en esta ventana se introducen las dimensiones del bruto con el que se vaya a trabajar.
- **Herramientas**: en esta ventana se pueden definir todas las herramientas necesarias para el proyecto de mecanizado.
- **Orígenes Programa**: en esta ventana se pueden establecer diferentes orígenes de programa para posteriormente utilizarlos en el código numérico.
- **Conexión CNC**: en el caso de que exista conexión entre el ordenador y la máquina-herramienta, en esta ventana podemos enviar/recibir programas de control numérico a la

máquina-herramienta, incluso ejecutar los programas una vez enviados a la máquina-herramienta.

- **Notas**: espacio en blanco donde el usuario puede realizar tantas anotaciones como quiera sobre el proyecto.

A continuación veremos las opciones de cada una de las pestañas disponibles en el Gestor de proyectos.

## PESTAÑA Programa CNC

Esta pestaña solo permite visualizar el código numérico del proyecto actual (Fig. 114).

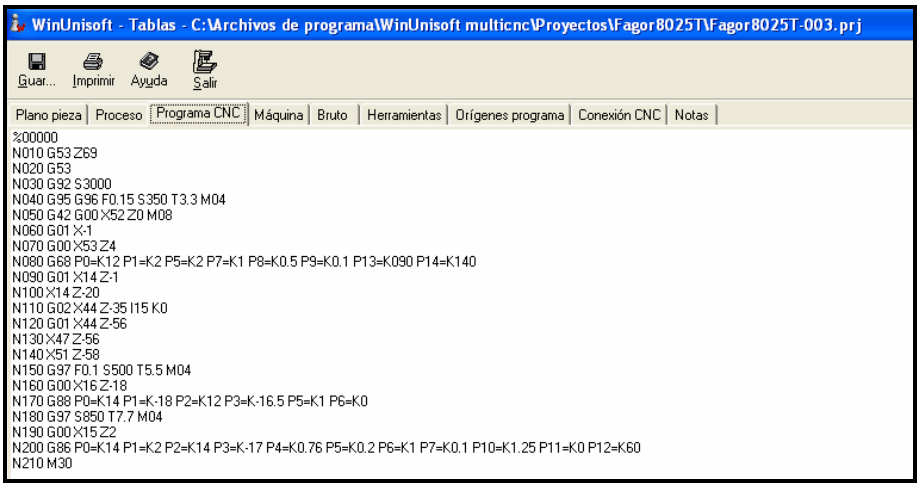



**Figura 114. Pestaña "Programa CNC" del Gestor de proyectos en el Simulador WinUnisoft.**

## PESTAÑA Máquina

En esta pestaña lo primero que haremos será seleccionar el tipo de máquina (Torno 2 ejes o Fresadora Z-vertical; en nuestro caso), el tipo de control numérico (opciones: 8025T, 8050T, Fanuc16iTA, FANUC16iTC, Sinu840DT y WinCT) y las unidades (en nuestro caso sólo acepta la opción "métrico").

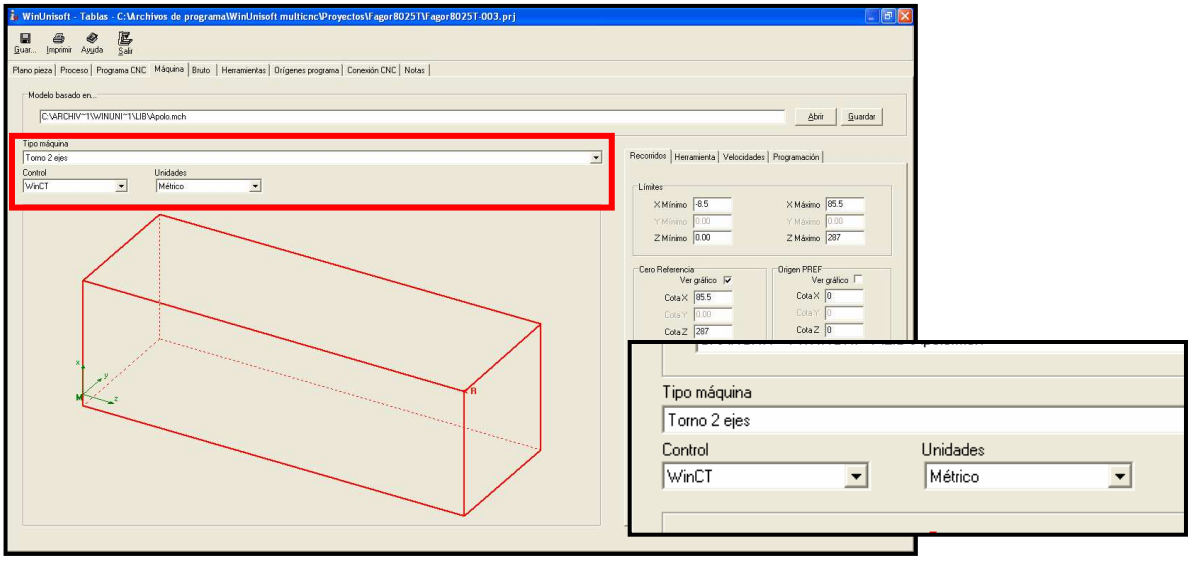



**Figura 115. Pestaña "Máquina" del Gestor de proyectos en el Simulador WinUnisoft.**

Al seleccionar la pestaña máquina, en la parte derecha de la pantalla aparecen otras cuatro pestañas: "Recorrido", "Herramienta", "Velocidades" y "Programación".

En "Recorrido" podemos establecer los límites del espacio de trabajo (Volumen de la máquina), con estos límites (de seguridad) evitamos que la herramienta pueda chocar con partes de la máquina durante el mecanizado (por errores en la edición del programa). Si el programa editado se sale de estos límites se producirá un error y no nos permitirá simular el mecanizado.

También podemos visualizar el **Cero Máquina** (letra **M** en la Fig. 116). Definir un nuevo **Cero Referencia/máquina** (**R** en la Fig. 116) y/o definir otro Origen PREF (preferencia) (se mostraría con la letra **Px** en la Fig. 116).

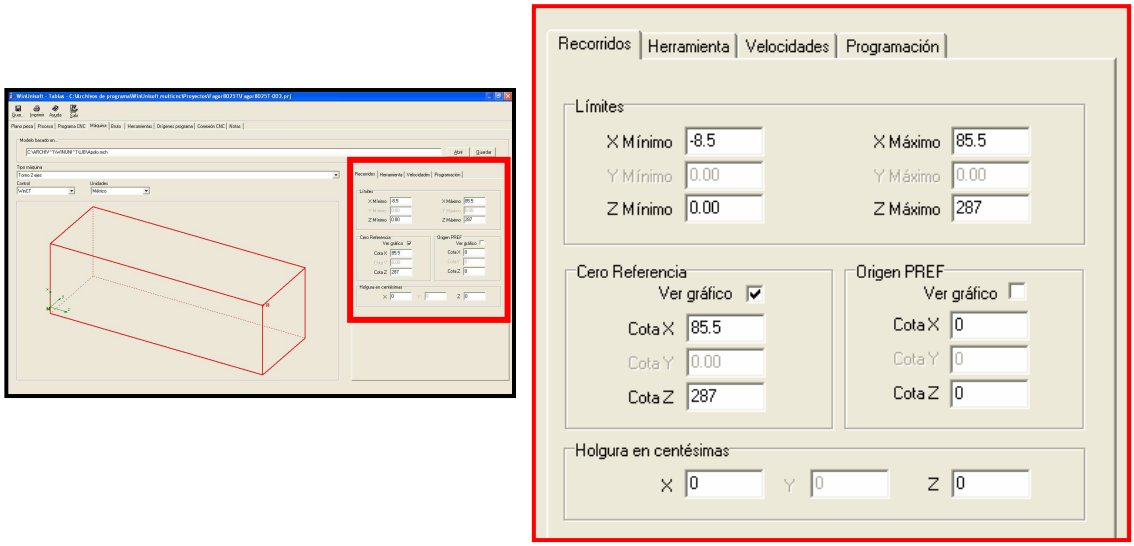



**Figura 116. Selección de Volumen de la Máquina y Orígenes/Cero Máquina.**

En "Herramienta" podemos seleccionar una posición fija para el cambio de herramienta. Si el cambio de la herramienta es automático se debe seleccionar un tiempo bajo; si el cambio es manual se debe seleccionar el tiempo suficiente para que el operario pueda cambiar la herramienta sin riesgos. **Nota: cuando el cambio de la herramienta es manual no se suele utilizar esta opción, se programa una parada del mecanizado en el que el reinicio del trabajo comienza cuando el operario lo indica en el panel de control. También podemos indicar la posición de la torreta porta-herramientas.**

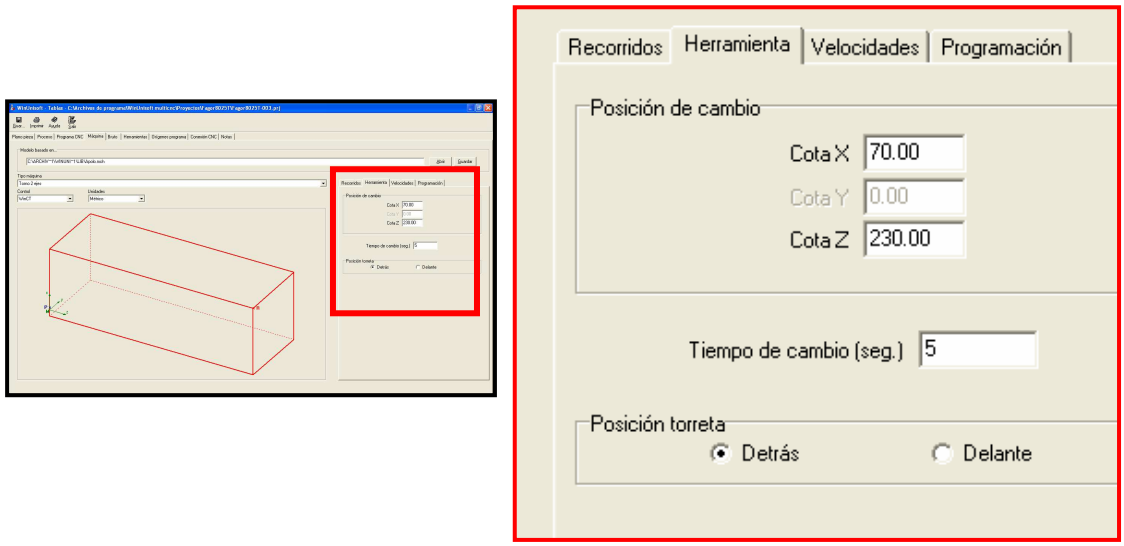



**Figura 117. Selección de Posición y Tiempo de cambio de la herramienta.**

En "Velocidades" podemos indicar la velocidad máxima y mínima de giro del cabezal (depende de las características de cada máquina-herramienta), el avance máximo de trabajo y el avance para los movimientos rápidos (sin corte G00).

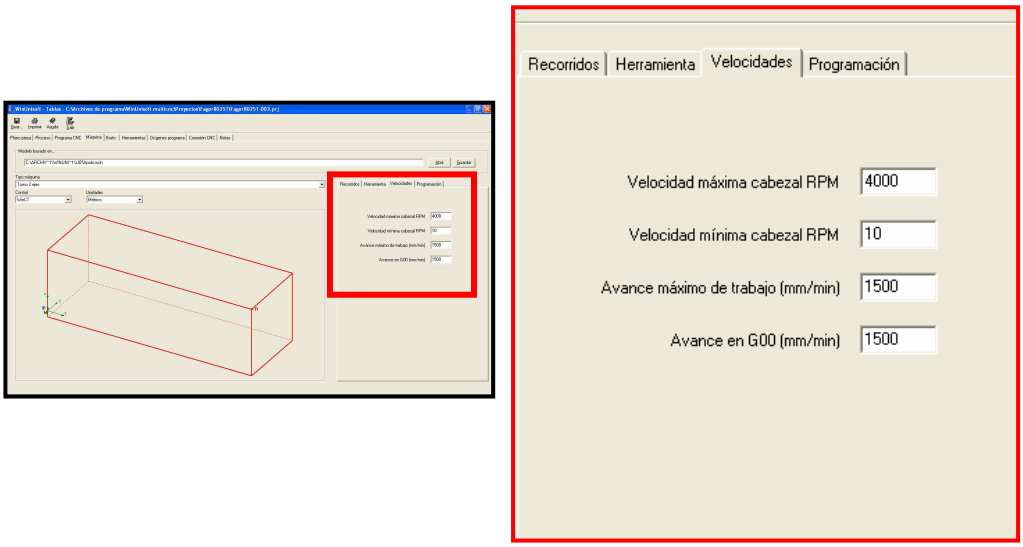



**Figura 118. Selección de Velocidades.**

En "Programación" podemos modificar el sentido de las funciones M02/M03 (indicando si M03 es giro del cabezal en sentido horario o anti-horario), las funciones G02/G03 (*idem*) y se puede establecer si queremos que las cotas en el ejes se establezcan en diámetros o radios (por lo general se suele seleccionar en diámetros).

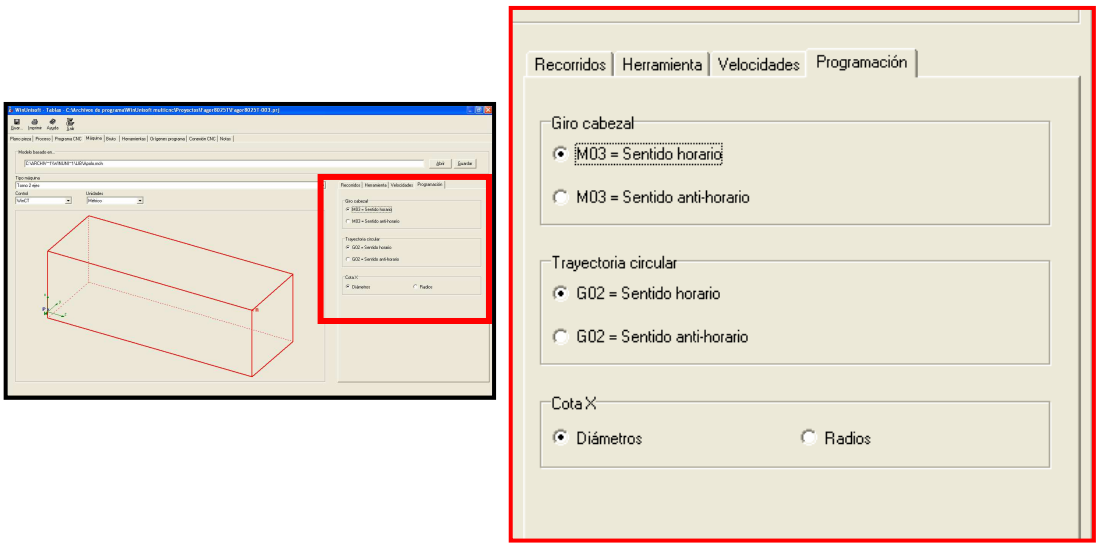



**Figura 119. Pestaña "Programación" dentro de la pestaña "Máquina".**

## PESTAÑA Bruto

En esta pestaña lo primero que haremos será seleccionar el tipo de bruto (para trabajos en torno la única opción habilitada es la de "cilindro en eje Z") y el tipo de fijación (ninguna o plato de garras). A continuación debemos introducir las dimensiones del bruto:

Si es tipo caja (para fresadora) las dimensiones a introducir serán:

- X, Z, Y mínimo.
- X, Z, Y máximo.

Si es tipo cilindro (para torno) las dimensiones a introducir serán (Fig. 120):

- Z mínimo: establece la longitud del cilindro que quedaría detrás del 0 pieza (si se usa fijación).
- Z máximo: establece la longitud mecanizable del bruto.
- Diámetro: dimensión en el eje X.
- Longitud de taladrado (eje Z): en el caso de que el bruto presente un orificio previo.
- Diámetro de taladrado (eje X): en el caso de que el bruto presente un orificio previo.

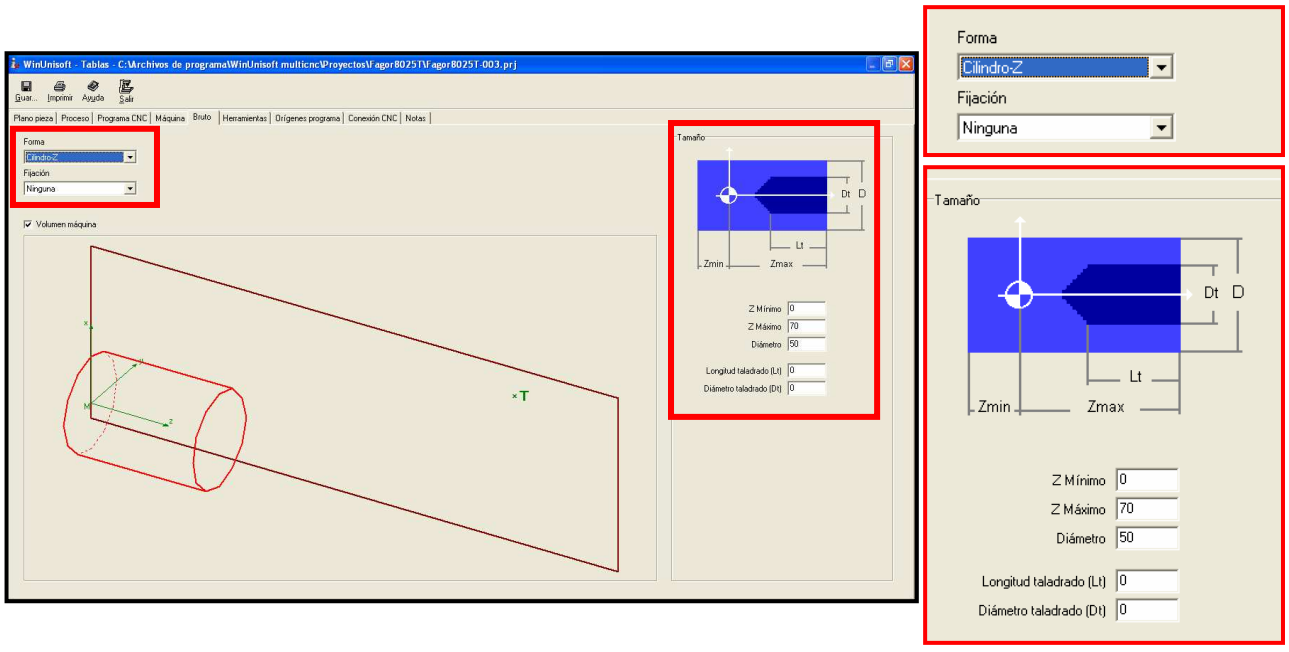



**Figura 120. Pestaña "Bruto" del Gestor de proyectos en el Simulador WinUnisoft.**

## PESTAÑA Herramientas

En esta pestaña el usuario puede definir todas las herramientas que vaya a utilizar en el mecanizado. El simulador WinUnisoft tiene una serie de "Librerias.LIB" con diferentes herramientas (las más usuales en trabajos de torno y fresado) de manera que el usuario sólo tiene que ir seleccionando el tipo de herramientas que va a utilizar e ir introduciendo todos los parámetros que la definan (longitudes, radios de corte, desgastes…).

Lo primero que deberemos hacer es seleccionar la librería de herramientas con la que queremos trabajar. A continuación podemos ir añadiendo herramientas, para cada herramienta el programa nos pide un número de herramienta (indica la posición de la herramienta en la torreta porta-herramientas) y un número de corrector.

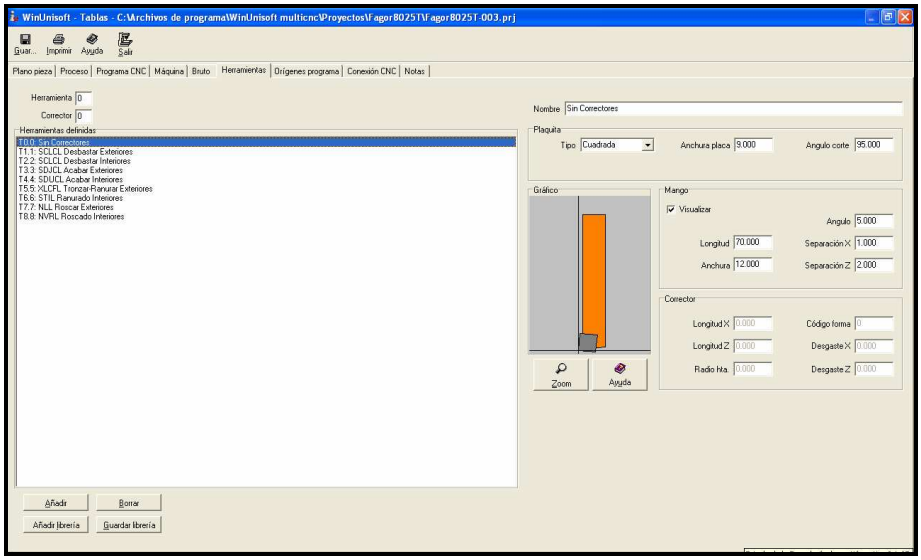



**Figura 121. Pestaña "Herramientas" del Gestor de proyectos en el Simulador WinUnisoft.**

En la siguiente Figura se muestra un ejemplo de los parámetros que hay que introducir para definir correctamente una herramienta rómbica para acabados exteriores.

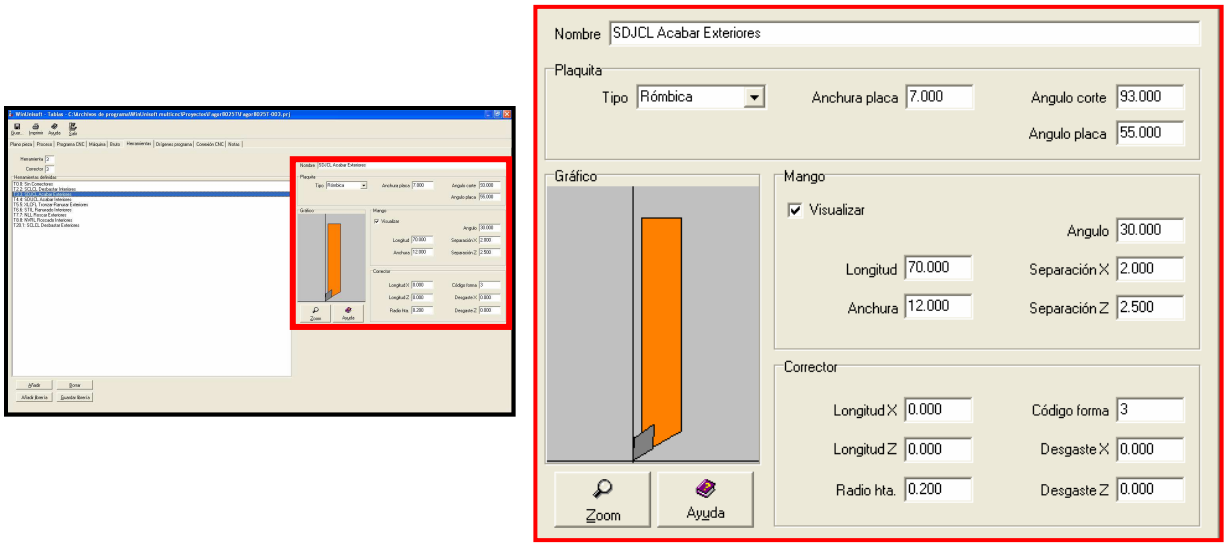



**Figura 122. Pestaña "Herramientas"; definición de herramienta rómbica.**

**En el documento "FI - Manual WinUnisoft.pdf" el alumno puede encontrar una descripción más detallada del tipo de herramientas más utilizadas en trabajos de torno y fresadora.**

## PESTAÑA Orígenes programa

En esta ventana se pueden establecer diferentes orígenes de programa para posteriormente utilizarlos en el código numérico (el número y tipo de función G dependerá del tipo de código control numérico seleccionado).

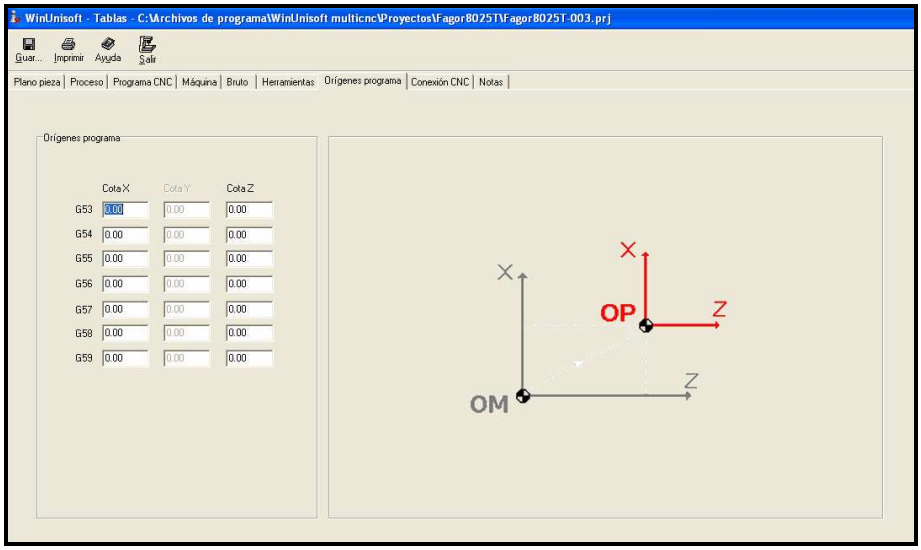



**Figura 123. Pestaña "Orígenes programa" del Gestor de proyectos en el Simulador WinUnisoft.**

## PESTAÑA Conexión CNC

En el caso de que exista conexión entre el ordenador y la máquina-herramienta, en esta ventana podemos enviar/recibir programas de control numérico a la máquina-herramienta, incluso ejecutar los programas una vez enviados a la máquina-herramienta.

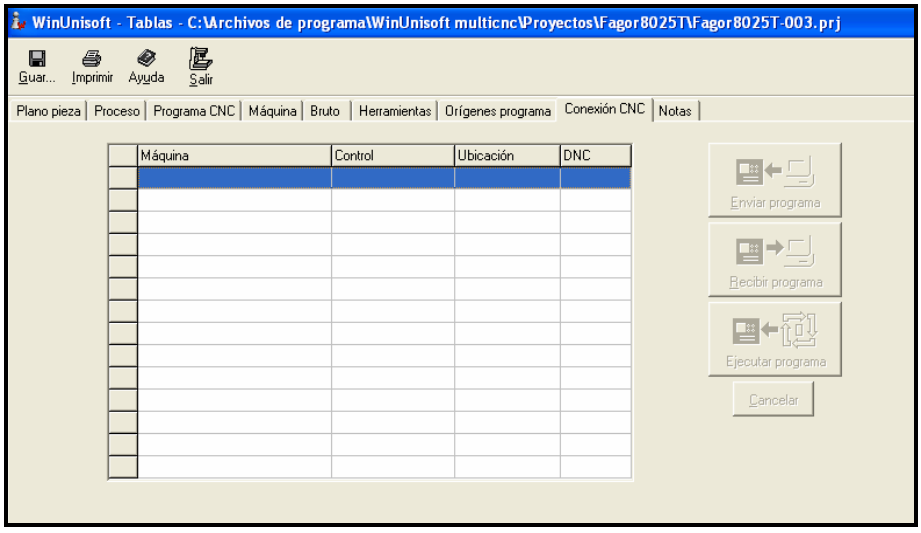



**Figura 124. Pestaña "Conexión CNC" del Gestor de proyectos en el Simulador WinUnisoft.**

## EDITOR CNC

Una vez introducidos todos los datos necesarios en el Gestor de Proyectos (definida la máquina, el bruto, las herramientas…) podemos abrir el editor CNC y comenzar a escribir el código numérico de nuestro programa (Fig. 125).

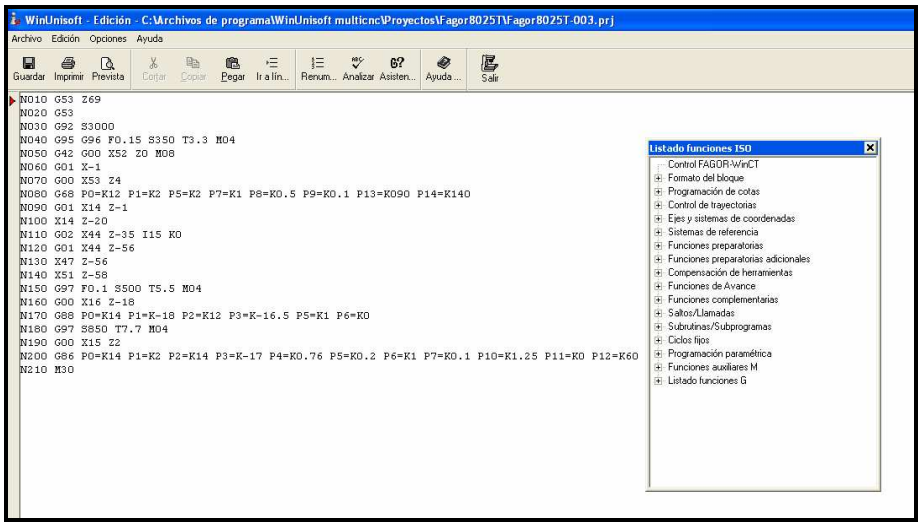



**Figura 125. Editor CNC en el Simulador WinUnisoft.**

La edición de los códigos CN con este simulador se realiza manualmente. Un aspecto positivo de este tipo de programas es que pone a disposición del usuario un menú de ayuda en el que se puede consultar el significado de todas las funciones del tipo de control numérico seleccionado en el Gestor de Proyectos. Por ejemplo, en la siguiente figura se muestra el menú de ayuda para el ciclo fijo de ranurado en el eje X.

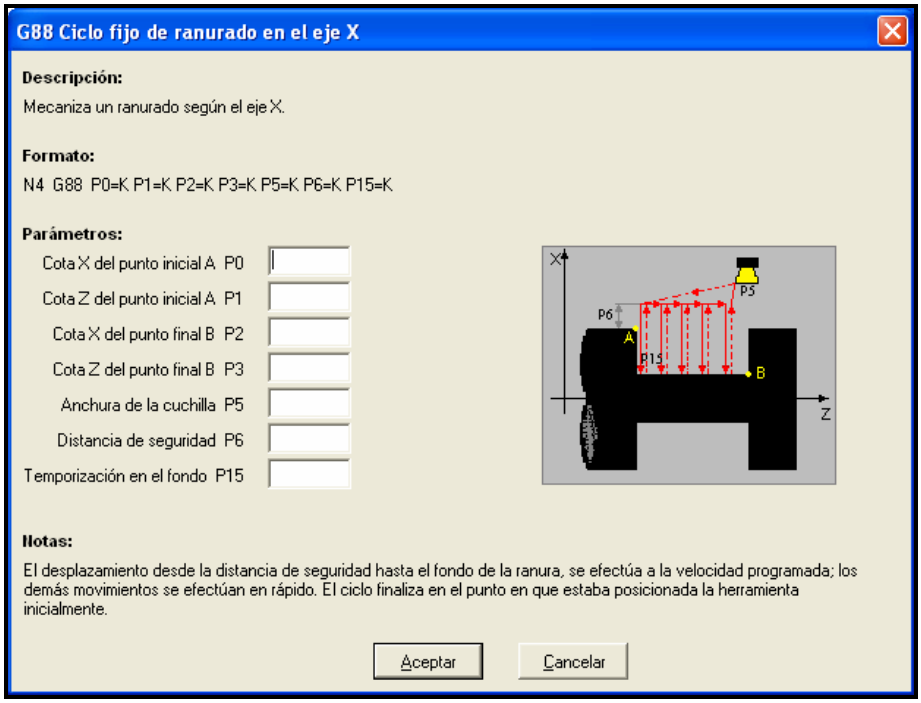



**Figura 126. Menú ayuda para el ciclo fijo de ranurado en el eje X.**

**Para más información el alumno puede consultar el menú ayuda del editor del programa WinUnisoft.**

## SIMULADOR CNC

Una vez editado el código numérico de nuestro proyecto podemos hacer una simulación del mismo. Si el programa detecta cualquier error de edición nos lo indicará y no nos permitirá visualizar la simulación del mismo.

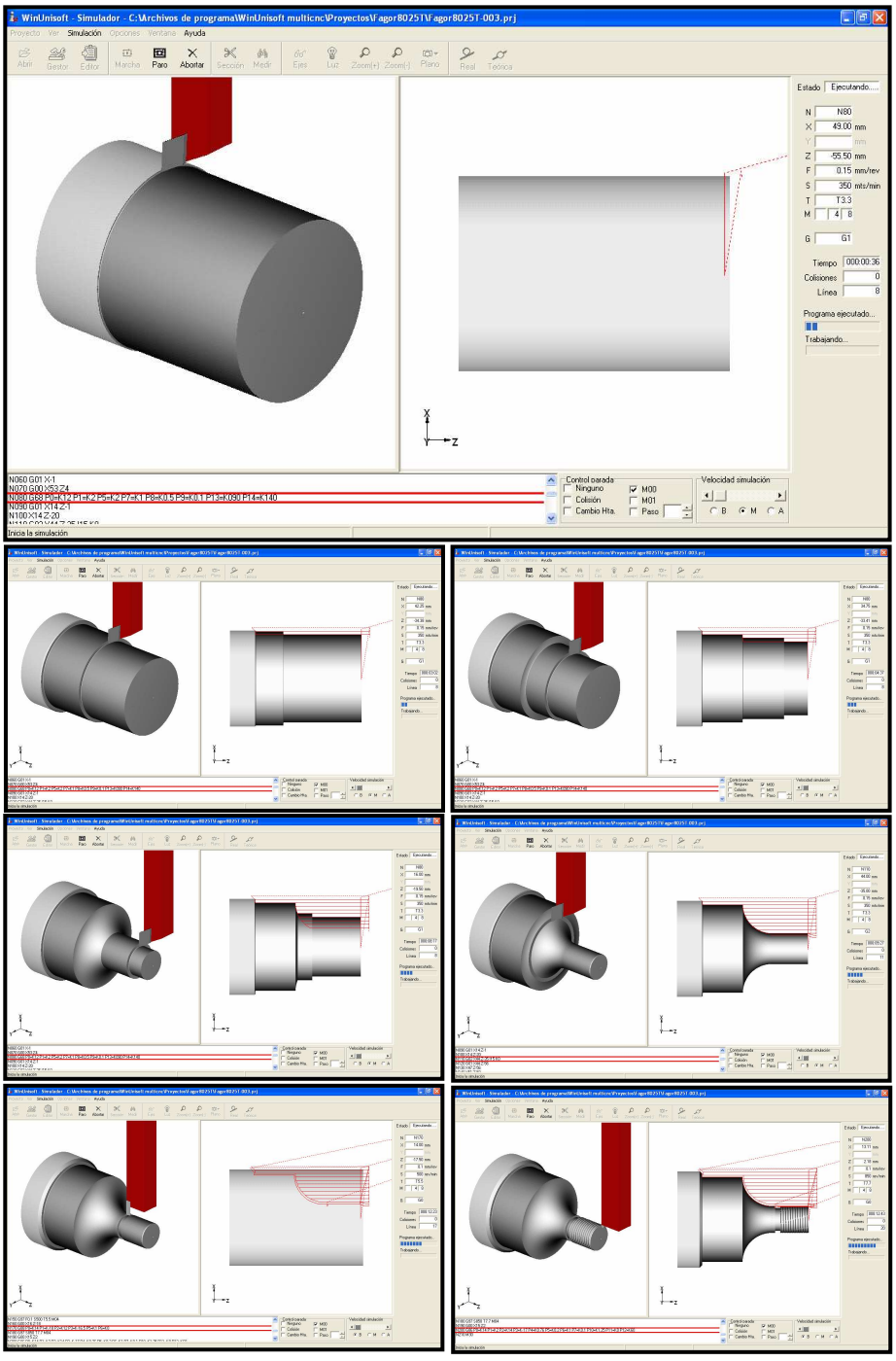



**Figura 127. Simulación del mecanizado en WinUnisoft.**

# DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO NUMÉRICO PARA EL PROYECTO EJEMPLO FAGOR 8025-003.PRJ

**N010 G53 Z69**

**N020 G53** {TRASLADAMOS EL ORIGEN PIEZA AL PUNTO X0 Z69}

**N030 S3000** {VELOCIDAD DE GIRO DEL CABEZAL 3000 RPM}

**N040 G95 G96 F0.15 S350 T3.3 M04** {G95 VELOCIDAD DE AVANCE EN MM/REV}

{G96 VELOCIDAD DE GIRO EN M/MIN; VELOCIDAD DE CORTE CONSTANTE}

{F0.15: VELOCIDAD DE AVANCE 0.15 MM/REV}

{S350: VELOCIDAD DE GIRO 350 M/MIN}

{T3.3: SELECCIÓN HERRAMIENTA ACABADO EXTERIORES}

{M04: GIRO DE CABEZAL A IZQUIERDAS, DEPENDE DE LO QUE SE HAYA ESTABLECIDO EN EL GESTOR DE PROYECTOS, EN ESTE CASO ES ANTI-HORARIO, A IZQUIERDAS}

**N050 G42 G00 X52 Z0 M08** {G42: COMPENSACIÓN DE RADIO A DERECHAS}

{G00: MOVIMIENTO RÁPIDO A UN PUNTO LIGERAMENTE POR ENCIMA DEL EXTREMO SUPERIOR DERECHO DEL BRUTO}

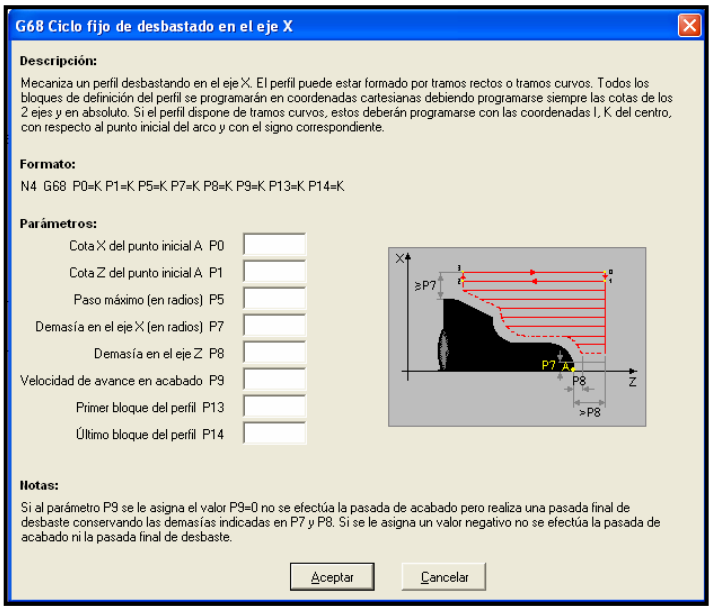
{M08: ACTIVAMOS REFRIGERANTE}

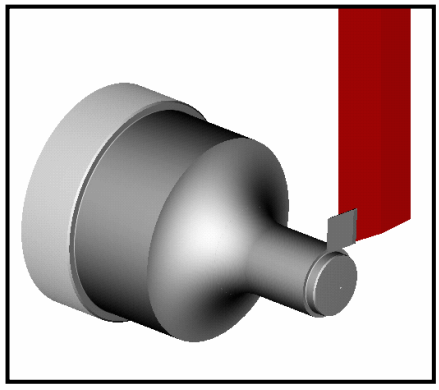
**N060 G01 X-1** {G01: CORTE, PRIMERA PASADA DE REFRENTADO}

**N070 G00 X53 Z4** {G00: MOVIMIENTO RÁPIDO, NOS ALEJAMOS DEL BRUTO}

**N080 G68 P0=K12 P1=K2 P5=K2 P7=K1 P8=K0.5 P9=K0.1 P13=K090 P14=K140**

{CICLO FIJO DE DESBASTADO EN EL EJE X}



**N090 G01 X14 Z-1** {G01: PASADA DE CORTE EN LA QUE REPASA EL PERFIL GENERADO CON G68}

**N100 X14 Z-20** {IDEM}

**N110 G02 X44 Z-35 I15 K0** {IDEM}

**N120 G01 X44 Z-56** {IDEM}

**N130 X47 Z-56** {IDEM}

**N140 X51 Z-58** {IDEM}

**N150 G97 F0.1 S500 T5.5 M04** **{G97: VELOCIDAD DE GIRO EN RPM}**

**{F0.1: VELOCIDAD DE AVANCE 0.1MM/REV}**

**{S500: VELOIDAD DE GIRO 500 RPM}**

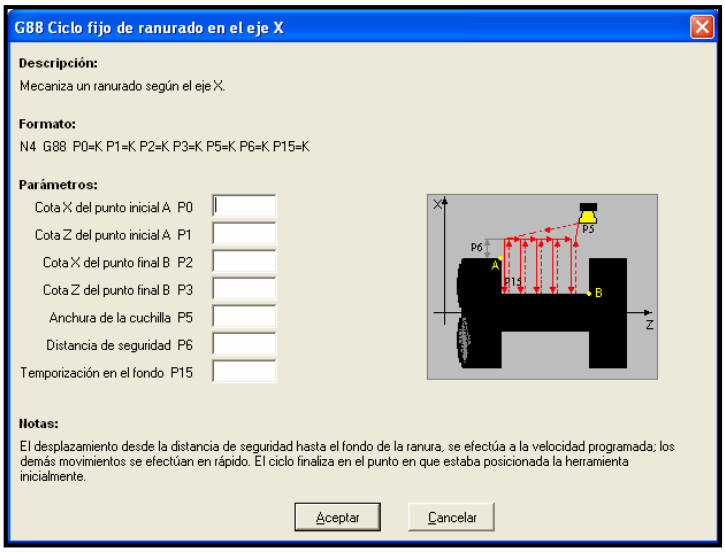
**{T5.5: SELECCIÓN HERRAMIENTA RANURADO}**

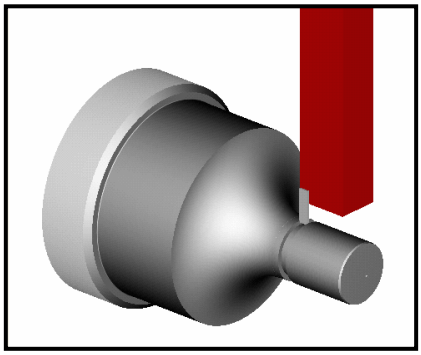
**{M04: GIRO DE CABEZAL A IZQUIERDAS}**

**N160 G00 X16 Z-18** **{G00: MOVIMIENTO RÁPIDO, ACERCAMIENTO AL BRUTO}**

**N170 G88 P0=K14 P1=K-18 P2=K12 P3=K-16.5 P5=K1 P6=K0**

**{CICLO FIJO DE RANURADO EN EL EJE X}**



**N180 G97 S850 T7.7 M04** **{G97: VELOCIDAD DE GIRO EN RPM}**

**{S850: VELOCIDAD DE GIRO 850 RPM}**

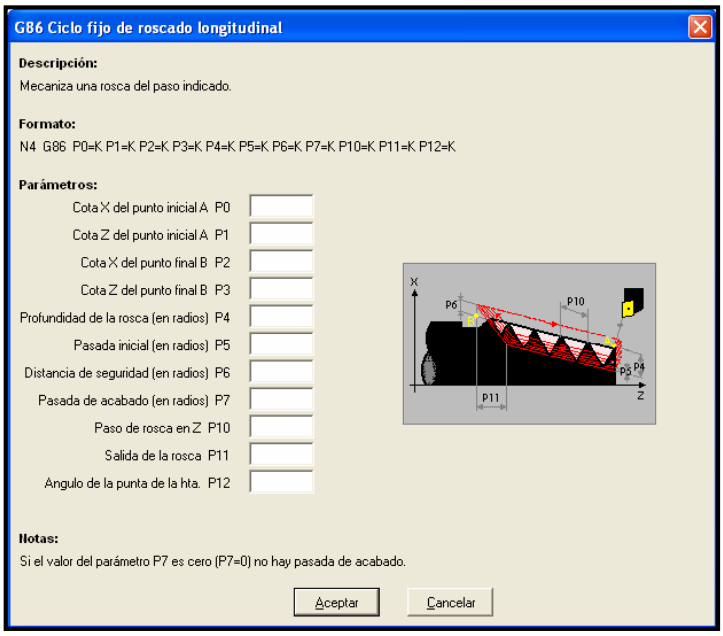
**{T7.7: SELECCIÓN HERRAMIENTA ROSCADO}**

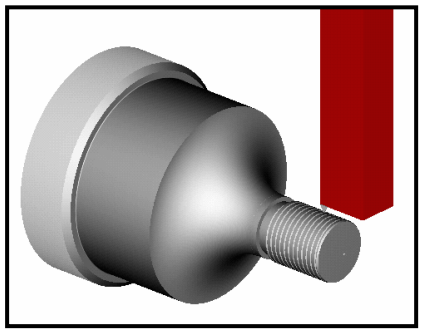
**{M04: GIRO DE CABEZAL A IZQUIERDAS}**

**N190 G00 X15 Z2** **{G00: MOVIMIENTO RÀPIDO}**

**N200 G86 P0=K14 P1=K2 P2=K14 P3=K-17 P4=K0.76 P5=K0.2 P6=K1 P7=K0.1 P10=K1.25 P11=K0 P12=K60**

**{CICLO FIJO DE ROSCADO LONGITUDINAL}**



**N210 M30** **{FIN DE PROGRAMA, VUELTA AL ORIGEN}**

## 4.5 Programación de máquinas-herramienta mediante programas CAD-CAM. SolidWorks y SolidCAM

En este apartado se va a realizar una breve descripción sobre el uso del complemento SolidCAM para la programación de fresadoras CNC a partir de diseños realizados en SolidWorks.

SolidCAM es un complemento que se puede utilizar con SolidWorks que permite de forma rápida y sencilla obtener el código numérico para el programa de piezas diseñadas en SolidWorks. Para explicar el funcionamiento del complemento SolidCAM nos apoyaremos en un ejemplo real del diseño de una pieza en SolidWorks para su mecanizado en una fresadora CNC. En la siguiente figura se muestra el diseño de la pieza en el entorno de SolidWorks, se trata de una matriz para punzonado.

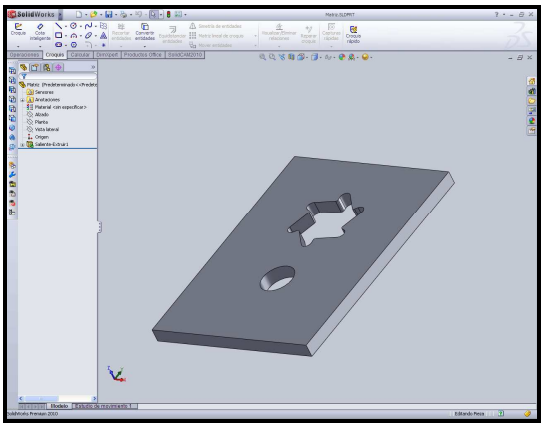


**Figura 128. Diseño de una matriz para punzonado en SolidWorks.**

Una vez realizado el diseño se ejecuta el complemento SolidCAM que tenemos incrustado en SolidWorks.

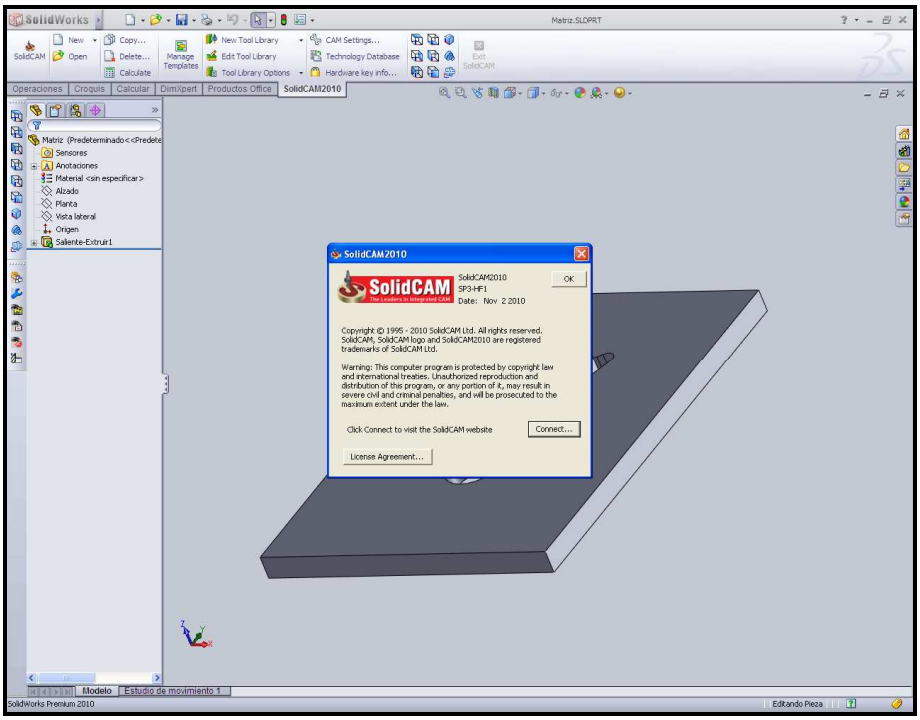



**Figura 129. Complemento SolidCAM en SolidWorks.**

El siguiente paso sería seleccionar que tipo de mecanizado queremos realizar. En nuestro caso se trata de un fresado *"milling"* (Fig. 130). Opciones disponibles: fresado, fresado-torneado, torneado, torno-fresado, fresado litografía y corte.

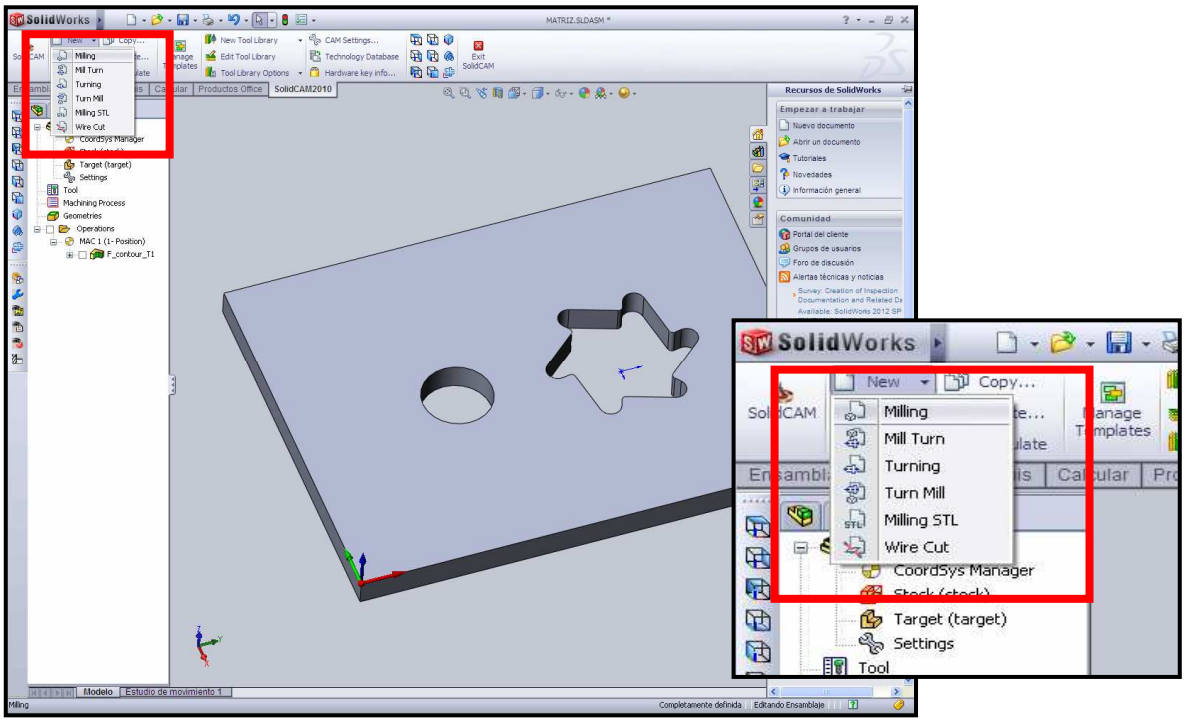



**Figura 130. Selección de mecanizado en SolidCAM.**

Una vez seleccionado el tipo de operación es necesario indicar que lenguaje de código numérico CNC queremos utilizar (Figura 131). Esta información es fundamental para obtener el CN de forma correcta. Suele ocurrir que el CN seleccionado no coincida exactamente con el CN de la máquina-herramienta con la que queremos trabajar. En este caso, una vez obtenido el código numérico se debe revisar y corregir aquellos comandos o funciones erróneas.

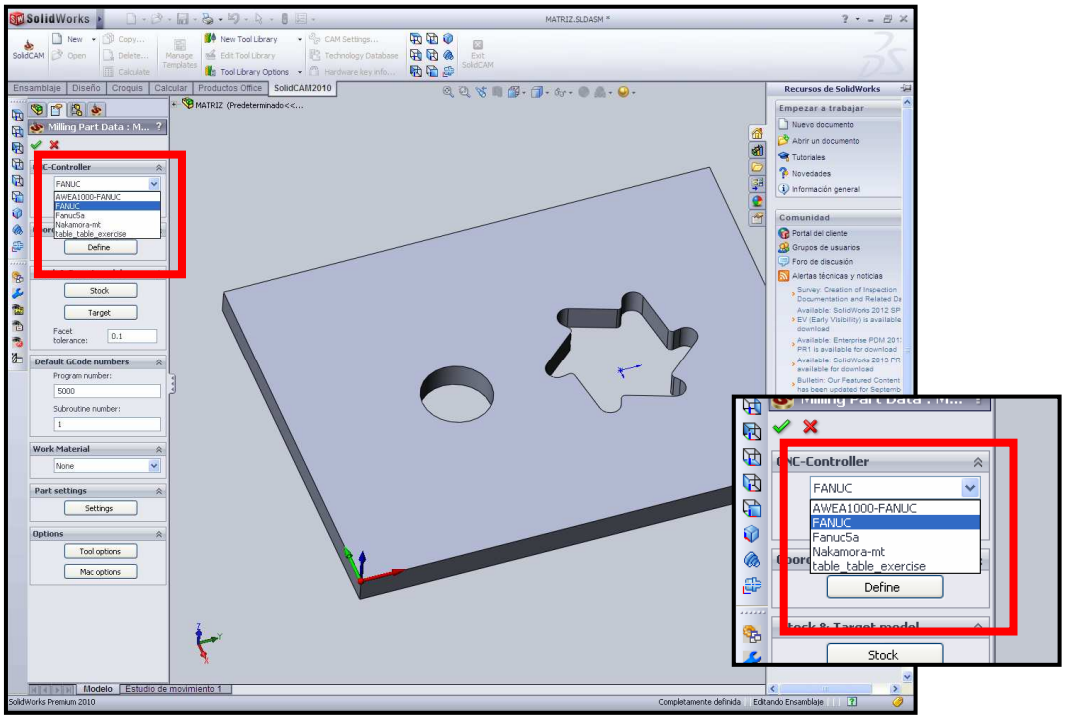



**Figura 131. Selección de código numérico CN en SolidCAM.**

El siguiente paso a realizar será seleccionar el Cero Pieza. El Cero Pieza que se selecciona para SolidCAM deberá tenerse en cuenta para seleccionar el mismo Cero Pieza en la máquina herramienta con la que se vaya a trabajar, en este caso una fresadora CNC.

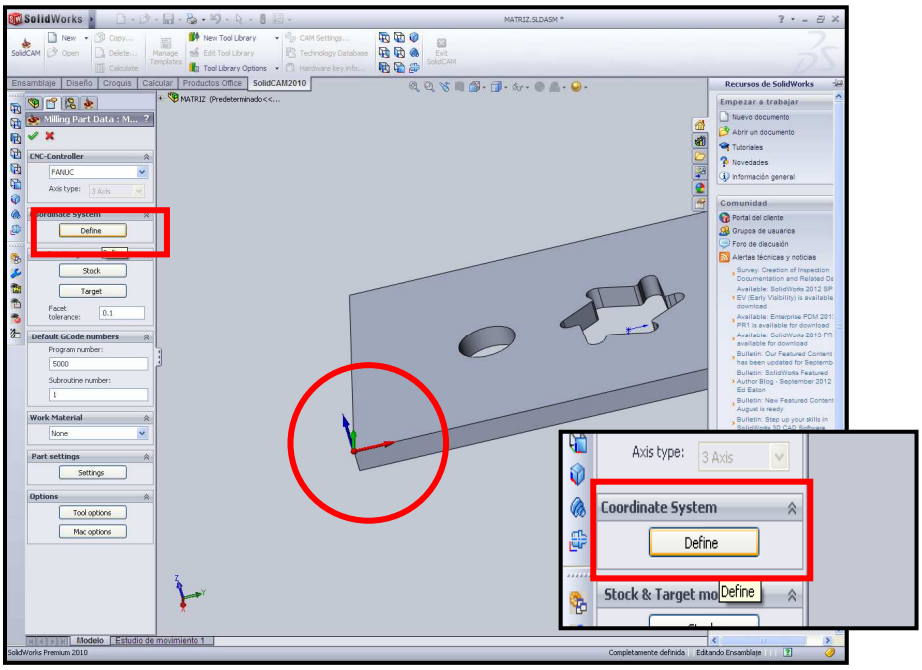



**Figura 132. Selección del cero pieza en SolidCAM.**

A continuación tenemos dos opciones:

- Trabajar con desbaste: la pieza diseñada (Fig. 128) se va a obtener a partir de un bruto (materia prima) de dimensiones superiores a las del diseño. En este caso debemos definir la cantidad de desbaste a realizar en cada eje (Fig. 133).
- Trabajar sin desbaste: la pieza diseñada se va a obtener a partir de un bruto (materia prima) de iguales dimensiones a las del diseño.

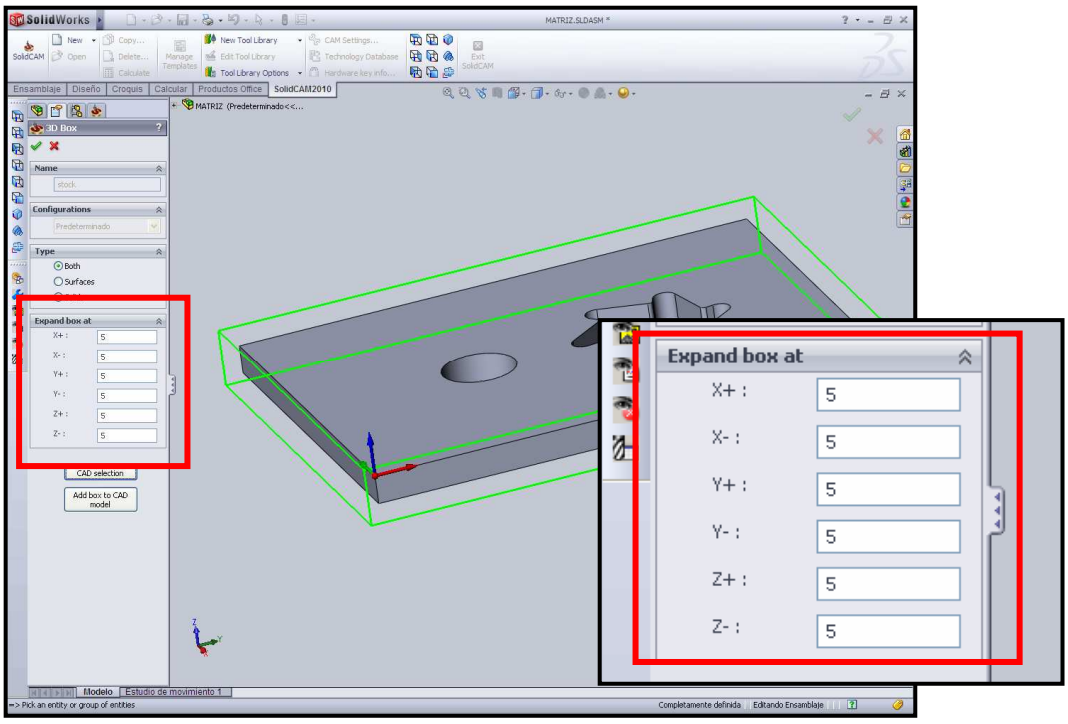



**Figura 133. Selección de las dimensiones del bruto en SolidCAM.**

A continuación debemos introducir las características de la/s herramienta/s herramientas que se van a utilizar en el trabajo de mecanizado. El complemento SolidCAM incorpora una base de datos con todas las herramientas más utilizadas en mecanizado. El usuario tan sólo debe seleccionar el tipo de herramienta que desea e ir introduciendo todos los parámetros necesarios para la completa caracterización de cada herramienta (dimensiones, radios de corte, longitudes de compensación…).

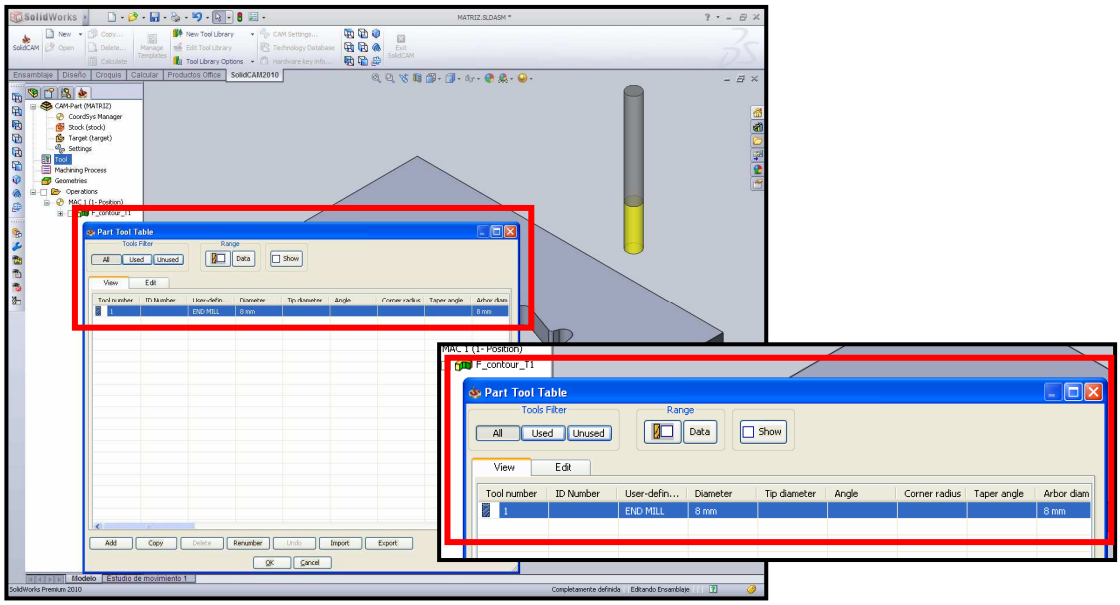



**Figura 134. Ventana para la selección de herramientas en SolidCAM.**

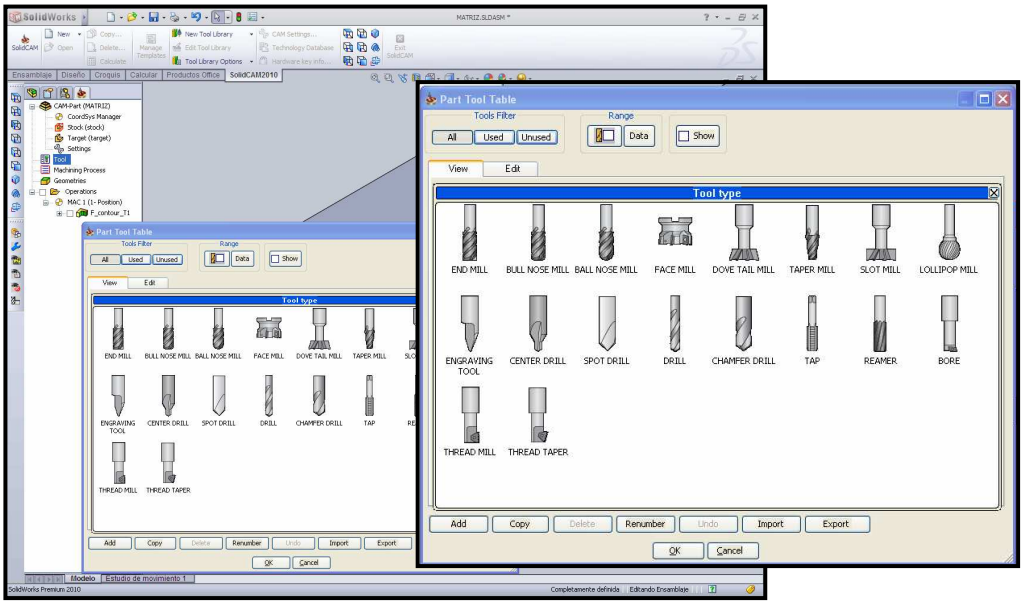



**Figura 135. Selección del tipo de herramienta para fresar en SolidCAM.**

Una vez seleccionada la herramienta deseada se abre una nueva ventana en la que iremos introduciendo todas las características necesarias para la correcta definición de la herramienta (Fig. 136). Cabe destacar la pestaña para introducir las dimensiones de la herramienta (Fig. 136), la pestaña para la selección de la velocidad de avance y la velocidad y sentido del giro (Fig. 137) y la pestaña para la selección del refrigerante/lubricante (Fig. 137).

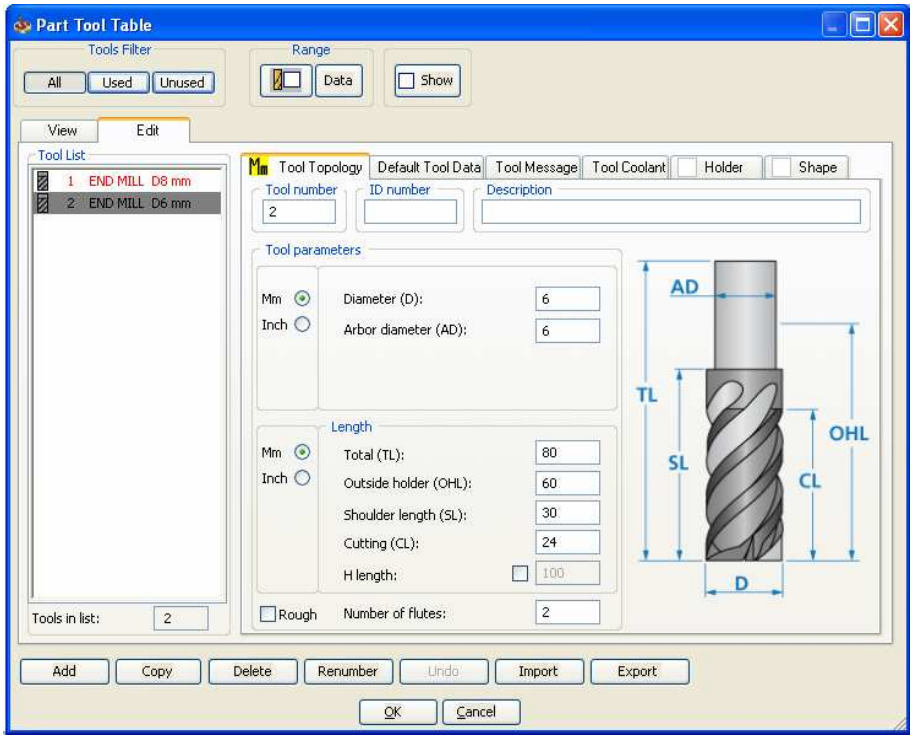



**Figura 136. Selección del tipo de herramienta para fresar en SolidCAM.**

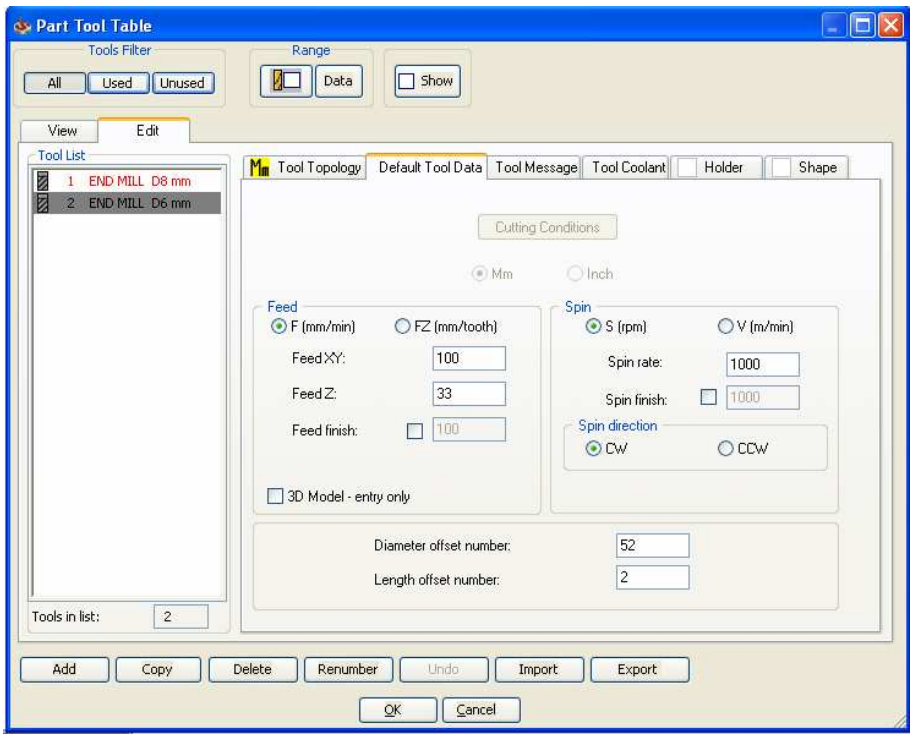



**Figura 137. Selección de la velocidad de avance y de giro en SolidCAM.**

En este punto ya tenemos definida la geometría de la pieza que queremos, seleccionado el tipo de mecanizado y el tipo de código numérico, hemos definido las dimensiones del bruto (materia prima), seleccionado el cero pieza e introducido todas las herramientas que se van a utilizar. Ya estamos en disposición de realizar el "mecanizado" de la pieza para obtener un archivo con el código numérico que debemos introducir en la máquina-herramienta.

Con el complemento SolidCAM el mecanizado de una pieza para fresado se realiza por contornos. Se van seleccionando los diferentes contornos de la pieza y, una vez definidos ciertos parámetros necesarios, se obtiene el código numérico.

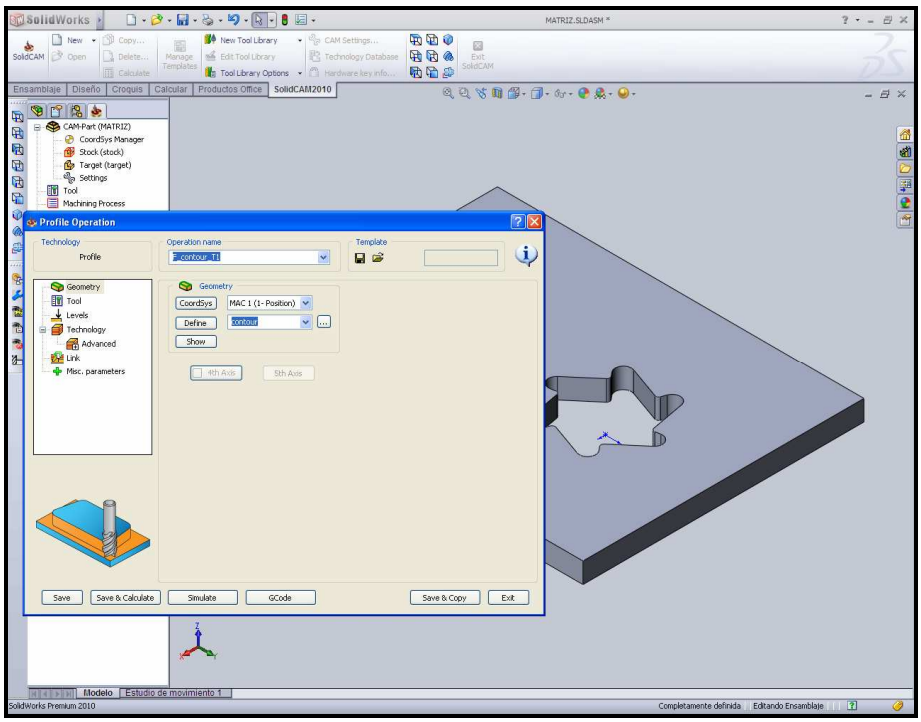



**Figura 138. Selección del contorno a mecanizar en SolidCAM.**

Una vez seleccionado el contorno debemos indicar la profundidad del mecanizado.

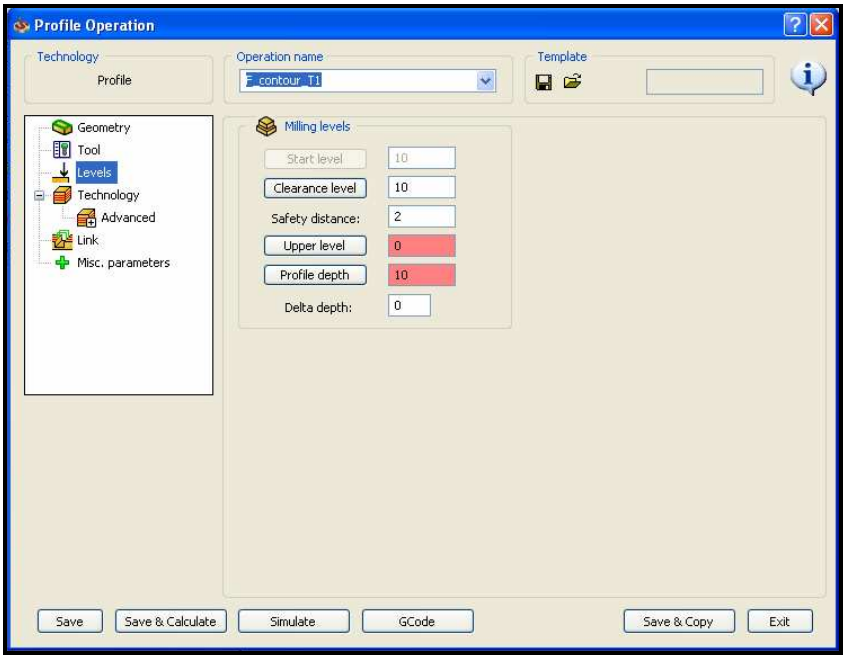



**Figura 139. Selección de profundidades en SolidCAM.**

Tecnologías de corte: una nueva ventana nos permite ir definiendo las tecnologías de corte que deseemos:

- Compensación de la herramienta.
- Profundidad
- Chaflanes
- Acabado

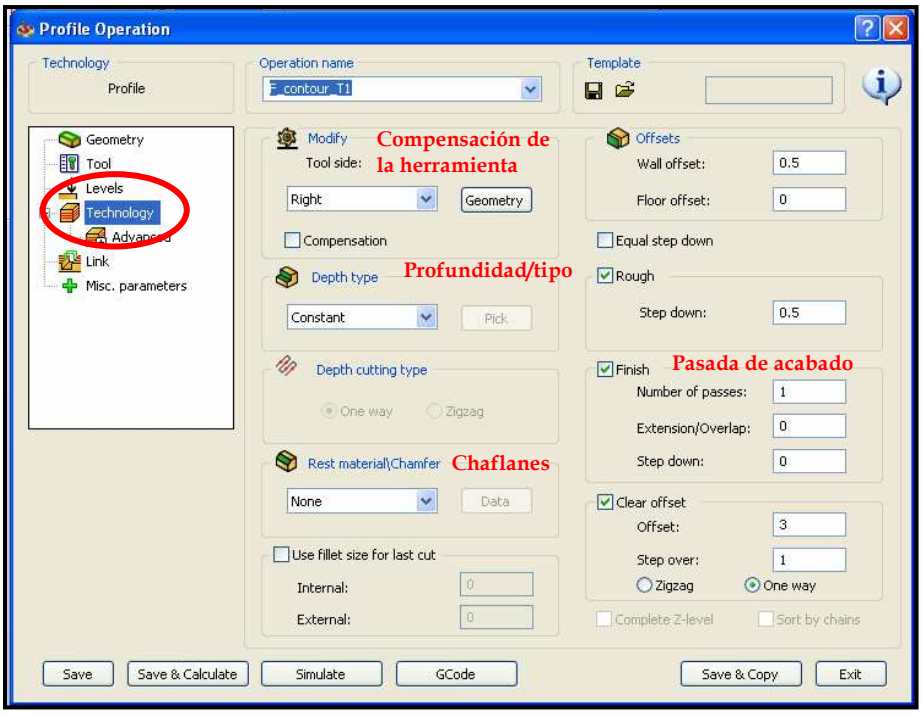



**Figura 140. Selección de tecnologías en SolidCAM.**

También nos permite seleccionar algunas tecnologías avanzadas: cortes finales (pasadas de acabado), ángulo de inclinación en los bordes…

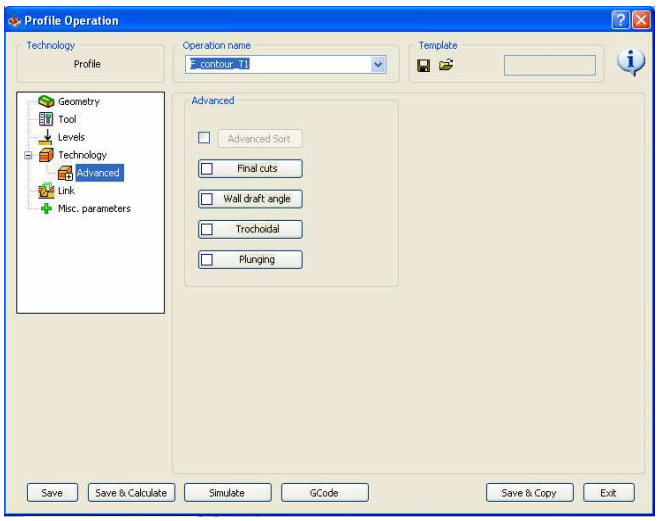



**Figura 141. Selección de tecnologías avanzadas en SolidCAM.**

Por último, antes de obtener el código numérico, podemos seleccionar si queremos entrada directa al contorno de trabajo o entrada con arco (Fig. 142).

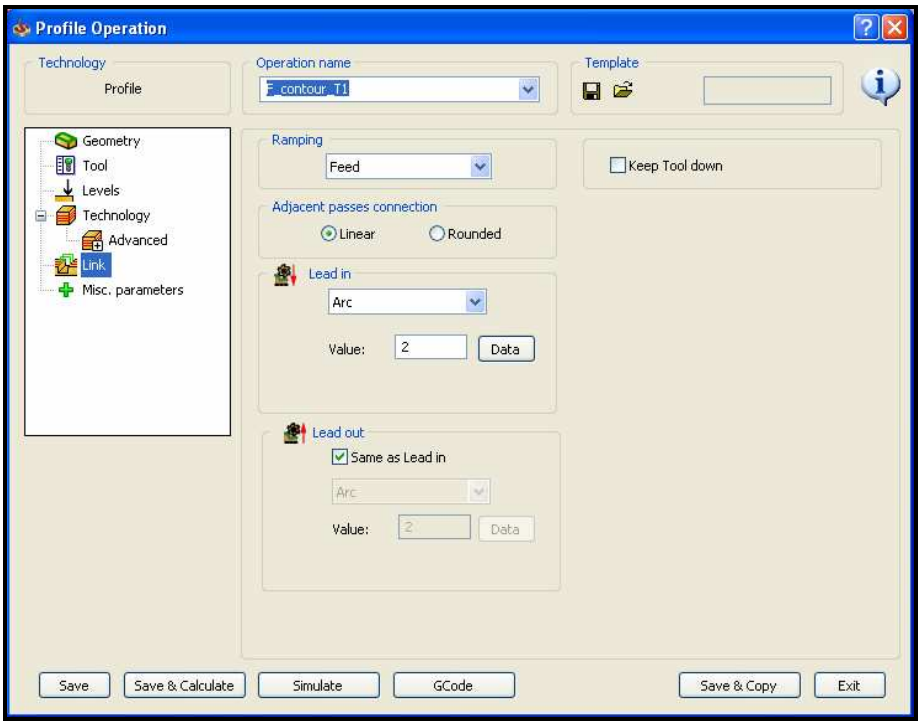



**Figura 142. Selección de entrada directa o con arco en SolidCAM.**

En la siguiente figura se muestra el contorno del mecanizado obtenido con el complemento SolidCAM para SolidWorks.

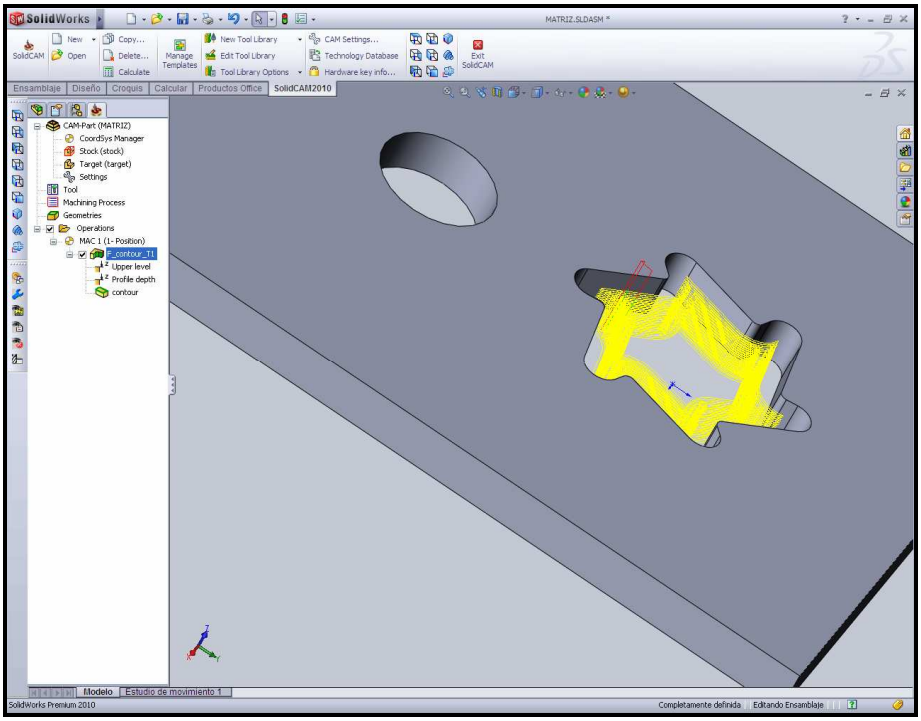



**Figura 143. Contorno mecanizado en SolidCAM.**

El usuario ya puede generar el código numérico CN y guardarlo en un archivo de texto para posteriormente importarlo en el ordenador de la máquina-herramienta (en el formato adecuado).

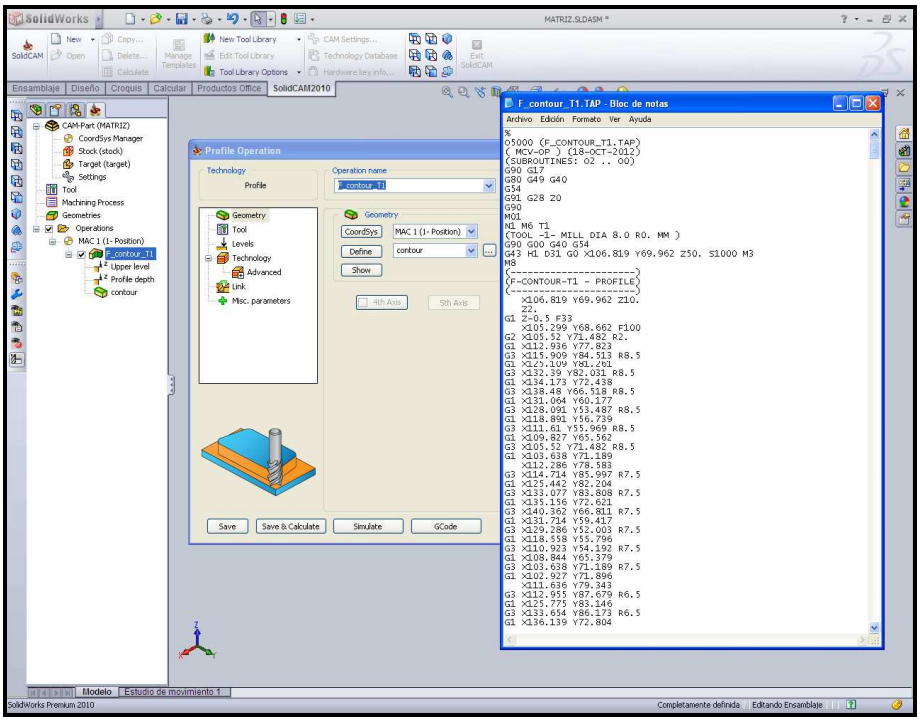



**Figura 144. Código numérico obtenido con SolidCAM.**

Cabe destacar que con en este tipo de complementos el código numérico que se obtiene suele estar compuesto de un gran número de ordenes sencillas (movimientos lineales y circulares). Como se observa en la Fig. 145 el código numérico generado carece de los ciclos fijos de mecanizado estudiados en el Tema 3.

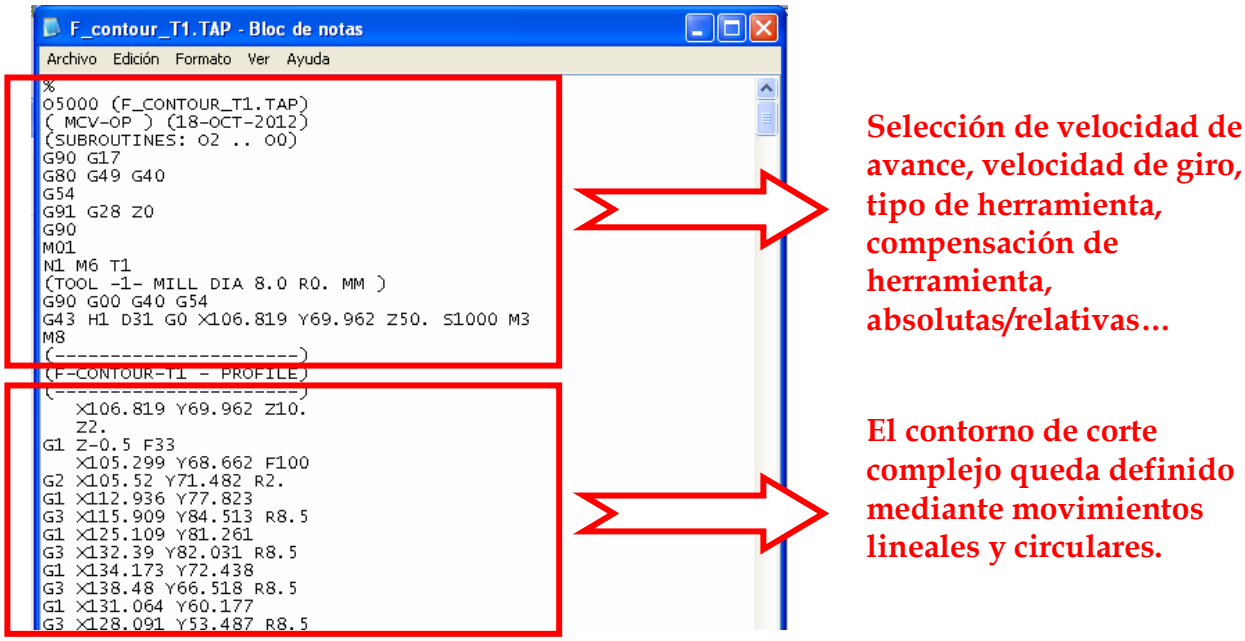



**Figura 145. Detalle del código numérico obtenido con SolidCAM.**

**Para más información a cerca del complemento SolidCAM se remite al alumno a la página Web (www.solidcam.com) y al enlace del *iprofesor***

http://www.solidcam.com/es/solidcam-profesor/imachining-overview/imachining-introduction/

# 5 TEMA 5: INTRODUCCIÓN AL MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD Y ALTA PRECISIÓN

## 5.1 Introducción

Dentro del ámbito del mecanizado se habla del "Mecanizado a Alta Velocidad" (HSM, por sus siglas en inglés), este concepto hace referencia a trabajos de mecanizado de propósito general en el que principalmente se persigue reducir el tiempo de trabajo a costa de:

- Reducir los tiempos de mecanizado.
- Reducir los tiempos muertos del mecanizado.

En este tipo de mecanizado se trabaja, un determinado material, a altas velocidades de corte y de avance en comparación con las velocidades que se utilizan para ese mismo material en mecanizado convencional. Algunos principios básicos:

- No se trata de eliminar un gran volumen de material a costa de aumentar la profundidad de pasada, la idea es trabajar o mecanizar pequeñas profundidades de pasada, pero a altas velocidades de corte y avance.
- Reducir el esfuerzo de corte. En vez de trabajar con herramientas robustas que eliminan grandes cantidades de material a poca velocidad, se trabaja con herramientas ligeras que eliminan poco material pero a gran velocidad.
- Al trabajar con fuerzas de corte bajas, el material no sufre tensiones residuales, el calentamiento de la pieza y de la herramienta es menor. Se elimina la necesidad de realizar tratamientos térmicos de la pieza tras su mecanizado.
- Conseguir acabados superficiales mejores al trabajar a mayor velocidad.

En la siguiente figura se muestran los campos de velocidades (en mecanizado convencional y a alta velocidad) para diferentes materiales. Cabe destacar que el campo de velocidades correspondientes al mecanizado a alta velocidad de determinado material puede corresponderse con las velocidades de otro material pero para mecanizado convencional. Por ejemplo, las velocidades en mecanizado convencional para plásticos reforzados abarcan velocidades correspondientes a mecanizado a alta velocidad para aceros.

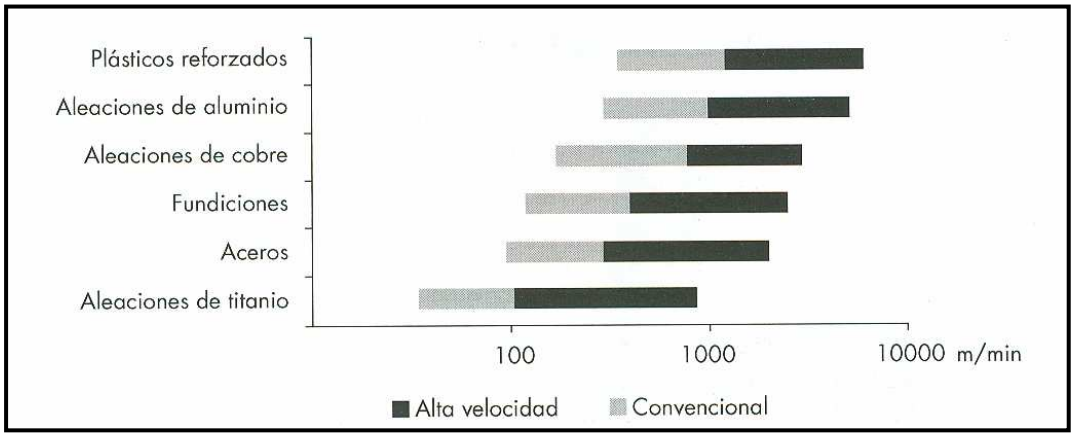



**Figura 146. Velocidades de corte en mecanizado convencional y de alta velocidad. (Fuente [2])**

Como guía general podemos establecer tres intervalos de velocidades de corte:

- Velocidad alta: 600-1800 m $min^{-1}$.
- Velocidad muy alta: 1800-18000 m $min^{-1}$.
- Velocidad ultra-alta: >18000 m $min^{-1}$.

La velocidad de giro del husillo puede llegar a alcanzar los 50000 rpm y la velocidad de avance de la herramienta de hasta 60 m $min^{-1}$. Debido a las grandes aceleraciones (efectos de inercia) se requiere de ligereza en los componentes de las máquinas (uso de materiales cerámicos, composites…)

Algunas características a tener en cuenta en máquinas-herramienta para el trabajo a alta velocidad son:

- El diseño del husillo debe asegurar la suficiente rigidez, precisión y equilibrio a velocidades de giro muy elevadas.
- Se deben seleccionar rodamientos adecuados que soporten las condiciones de trabajo.
- Se debe dar especial importancia a la inercia de los componentes de la máquina-herramienta.
- Diseño de transmisiones de avance rápido.
- Selección de las herramientas adecuadas.
- Sistema de control por ordenador avanzado capaz de gestionar los movimientos de la máquina y todo el proceso de mecanizado.
- Sistemas de sujeción de las piezas de trabajo y de las herramientas que soporten altas fuerzas centrífugas.
- Sistemas de expulsión o recogida de virutas a altas velocidades

Con el objetivo de reducir los tiempos muertos en el mecanizado a alta velocidad se trabaja en:

- Adaptación de las máquinas.
- Adaptación de las herramientas.
- Adaptación de los controles y sistemas de gobierno (control numérico)

**Controles y Sistemas de Gobierno**

Los controles numéricos en mecanizados de alta velocidad deben tener sensores más precisos para poder llevar un control adecuado de todos los movimientos de la máquina. Son muy importantes los controles adaptativos (aquellos que pueden medir determinadas variables de su entorno y modificar las ordenes según estas).

Se debe integrar el diseño (CAD) y la fabricación (CAM) para poder hacer simulaciones de los procesos de mecanizado antes de realizar las pruebas sobre la máquina y antes de entrar en producción. Las máquinas de alta velocidad son muy delicadas, se deben reducir al mínimo los posibles errores sobre la máquina (colisiones de la herramienta, sobreaceleraciones…).

**Figura 147. Centro de mecanizado de 5 ejes.**

### Herramientas

Son fundamentales en el mecanizado a alta velocidad. Existe una amplia gama de herramientas (de metal duro, cerámicas, cermets o nitruro de boro cúbico) para el mecanizado de diferentes materiales.

Para poder trabajar a alta velocidad se requiere mejorar las características de las herramientas (composición, recubrimiento…) y, además, es necesario mejorar los sistemas de amarre y acoplamiento de la herramienta y su equilibrado.

El sistema de amarre de las herramientas debe:

- Permitir el cambio rápido de herramienta.
- Ser fiable.
- Permitir trabajar a elevadas velocidades de giro (bien equilibradas). Actualmente, se están imponiendo los sistemas de amarre de herramientas con equilibrado automático.

Además, un correcto equilibrado de la herramienta incide positivamente en el acabado superficial de las piezas de trabajo y en la vida útil de la herramienta.

### Máquinas

Las máquinas-herramienta para trabajos de mecanizado a alta velocidad presentan características muy diferentes de las convencionales:

- Son ligeras.
- Con movimientos de avance rápidos.
- Con movimientos en vacío rápidos.
- Permiten aplicar velocidades de normales para materiales ligeros (plástico, madera…) en materiales pesados (aceros…).
- Se reducen las vibraciones al trabajar con velocidades muy por encima de las que producen vibraciones propias (frecuencias de resonancia) en la estructura de la máquina.
- La ligereza de la máquina reduce la inercia, lo que permite trabajar con aceleraciones mayores y facilita el control de los movimientos.

Algunos ejemplos:

- *Centros de taladrado y roscado de alta velocidad*: obtienen viruta pequeña fácil de evacuar. Giro del husillo a 16000 rpm. Desplazamientos rápidos a 48 m $min^{-1}$. Aceleraciones superiores a 1 g. Tiempos de cambio de herramienta inferiores a 1 segundo.

- *Torneado a alta velocidad*: pueden competir con máquinas de rectificado en cuando a acabado superficial se refiere. Giro de la pieza 10000 rpm. Con precisiones de posicionamiento de la herramienta de ±0.2 µm.

- *Fresadoras y Centros de Mecanizado de alta velocidad*: trabajan con esfuerzos de corte muy bajos. Giro del husillo a 30000 rpm. Desplazamientos rápidos a 40 m $min^{-1}$. Aceleraciones superiores a 1 g. Tiempos de cambio de herramienta inferiores a 1.5 segundos.

- *Máquinas tipo Hexápodo u Octópodo*: campos de acción de 500×600 $mm^2$ e inclinaciones de la herramienta superiores a los 40º. Giro del husillo a 45000 rpm. Desplazamientos de la herramienta en avance por encima de 60 m $min^{-1}$. Aceleraciones superiores a 3 g.

## 5.2 Centros de Mecanizado

Los centros de mecanizado, controlados por ordenador, cuentan con la flexibilidad y versatilidad que les falta a otras maquinas-herramienta individuales (torno, fresadora…). Podemos introducir aquí el término de **máquina reconfigurable**: son máquinas con componentes modulares que permiten modificar la configuración de la máquina.

En la siguiente figura se muestran dos ejemplos de piezas para cuya fabricación es necesario realizar más de una operación básica de mecanizado (torneado, fresado, taladrado…).

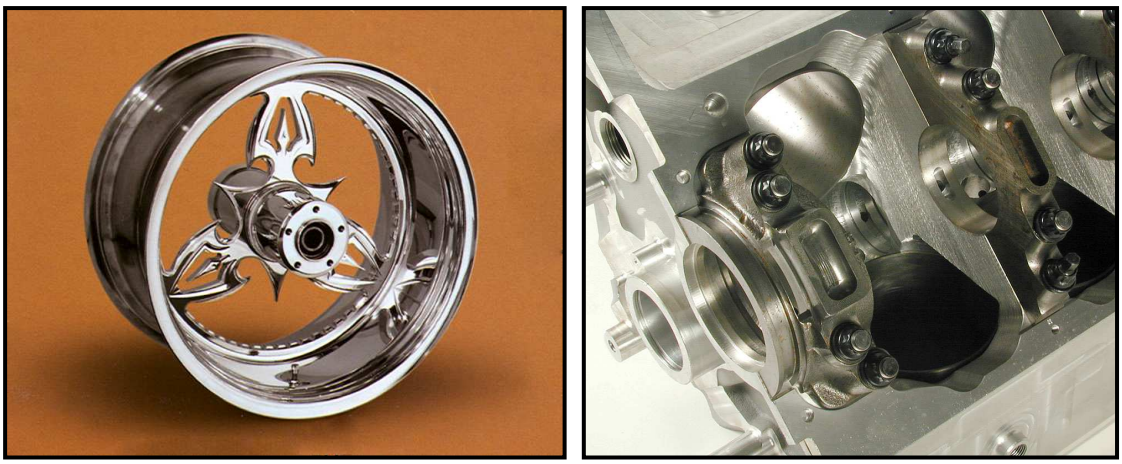


**Figura 148. Ejemplos de piezas obtenidas en centros de mecanizado. (Fuente [1])**

Para obtener las piezas de la Figura 148 se puede recurrir a la fundición, metalurgia de polvos o forjado, entre otros. En cualquier caso, si fuese necesario realizar operaciones de acabado (o fuese más económico obtener estas piezas directamente mediante mecanizado), dada la complejidad de su geometría, no se podrían obtener con máquinas-herramienta "individuales" como torno o fresadora.

**Centro de Mecanizado:** concepto desarrollado a finales de la década de 1950; es una máquina-herramienta avanzada, controlada por ordenador, que tiene la capacidad de realizar diferentes operaciones de mecanizado, en diferentes superficies y orientaciones de la pieza de trabajo sin necesidad de retirar la pieza de trabajo de la mesa de la máquina. Por lo general la pieza de trabajo permanece fija en la mesa de trabajo mientras que las diferentes herramientas del centro de mecanizado van trabajando la pieza.

Los centros de mecanizado pueden incluir todo tipo de herramientas.

La pieza de trabajo en un centro de mecanizado se coloca en un pallet o tarima (Fig. 149) que se puede mover y girar. Esto permite cambiar la orientación de la pieza de trabajo entre operación y operación de mecanizado.

En los centros de mecanizado se disponen de diversas tarimas o pallet que se pueden desplazar, son las encargadas de llevar las piezas de trabajo a la posición correcta para el mecanizado, una vez finalizado el trabajo, el pallet se retira de forma automática y un nuevo pallet se encarga de traer una nueva pieza de trabajo (cambiador automático de pallets). El cambio de pallet suele durar entre 10 y 30 segundos.

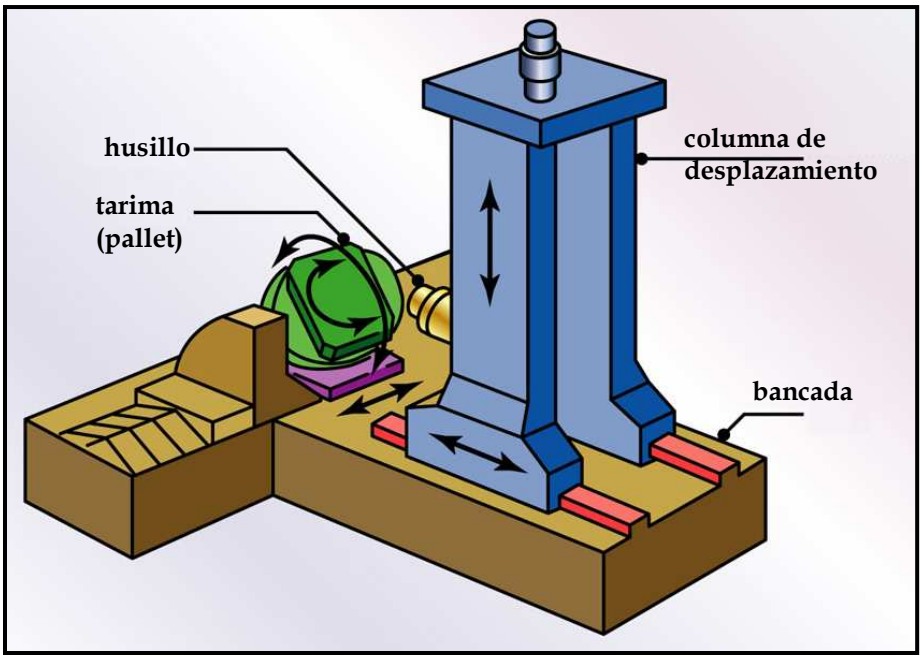



**Figura 149. Esquema de un centro de mecanizado de 5 ejes.** **(Fuente [1])**

Los centros de mecanizado cuentan además con dispositivos de cambio automático de herramientas, pudiendo almacenar hasta 200 herramientas en carrusel, tambor o cadena. La selección y cambio de herramienta es automático, estableciendo el control de la máquina la ruta más rápida para llegar a la herramienta seleccionada. Al espacio accesible por la herramienta, las máximas dimensiones que las herramientas pueden alcanzar alrededor de la pieza, se le denomina **envolvente o volumen de trabajo**.

Generalmente, cada herramienta incorpora su propio portaherramientas (Fig. 150) de modo que el cambio automático de herramienta hasta el husillo de giro es más eficiente. Las herramientas suelen codificarse mediante códigos de barra, etiquetas codificadas o chips de memoria incorporados. El tiempo de cambio suele estar entre 5 y 10 segundos (30 segundos para herramientas muy pesadas).

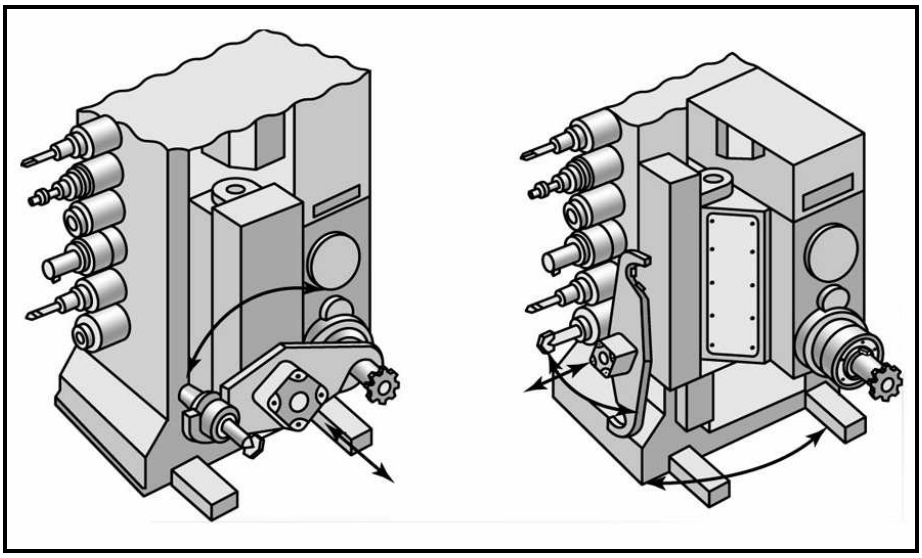


**Figura 150. Cambiador de herramienta oscilante.** **(Fuente [1])**

Otros componentes de los centros de mecanizado:

- Estaciones de verificación de herramienta o de pieza: permiten compensar cualquier variación en la pieza de trabajo (ajuste) o en las herramientas (ajuste o desgaste).
- Sondas o palpadores de contacto (incluidas en el porta-herramientas o en la tarima) que permiten determinar las superficies de referencia en la pieza de trabajo. Se pueden utilizar para determinar las superficies de trabajo, inspeccionar el acabado de las piezas, medir las dimensiones de las herramientas. Estos datos se utilizarán posteriormente al programar las trayectorias de las herramientas (compensación de la longitud, diámetro de las herramientas, incluso el desgaste).

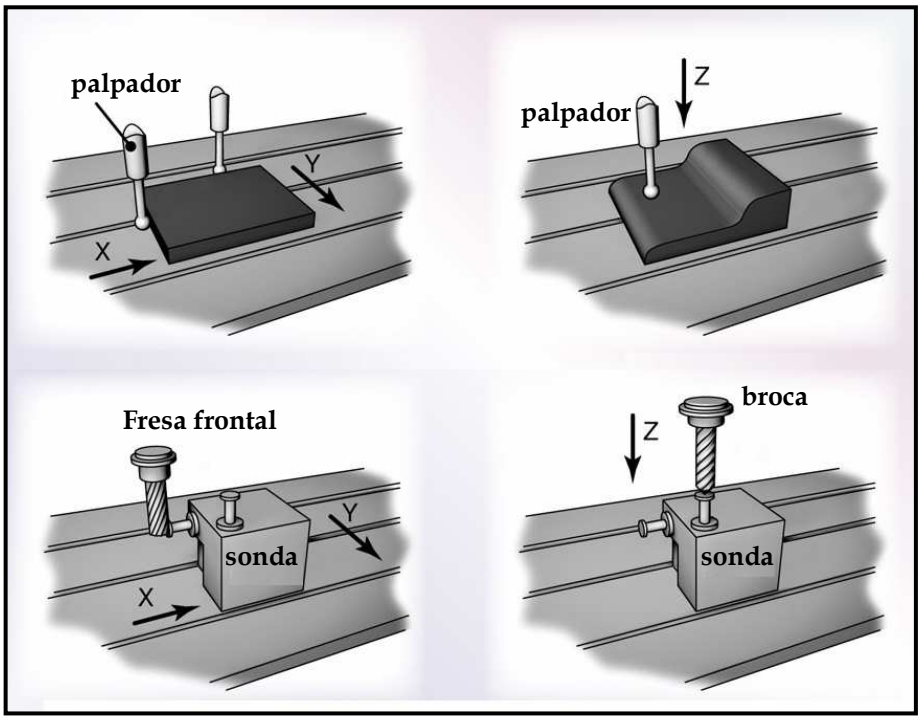



**Figura 151. Sondas o palpadores de contacto.** **(Fuente [1])**

## 5.3 Tipos de Centros de Mecanizado

Los dos tipos básicos son los de "husillo vertical" y los de "husillo horizontal", aunque existen centros de mecanizado con la capacidad de trabajar en ambos ejes.

- *Centros de mecanizado "de husillo vertical" o "verticales"*: tienen la capacidad de trabajar en orificios profundos (por ejemplo para fabricar moldes y matrices). Se asemeja en apariencia a una fresadora de husillo vertical. Las fuerzas de empuje se dirigen hacia abajo, son máquinas de gran rigidez y presentan buena precisión dimensional. En general, son menos costosas que las horizontales.

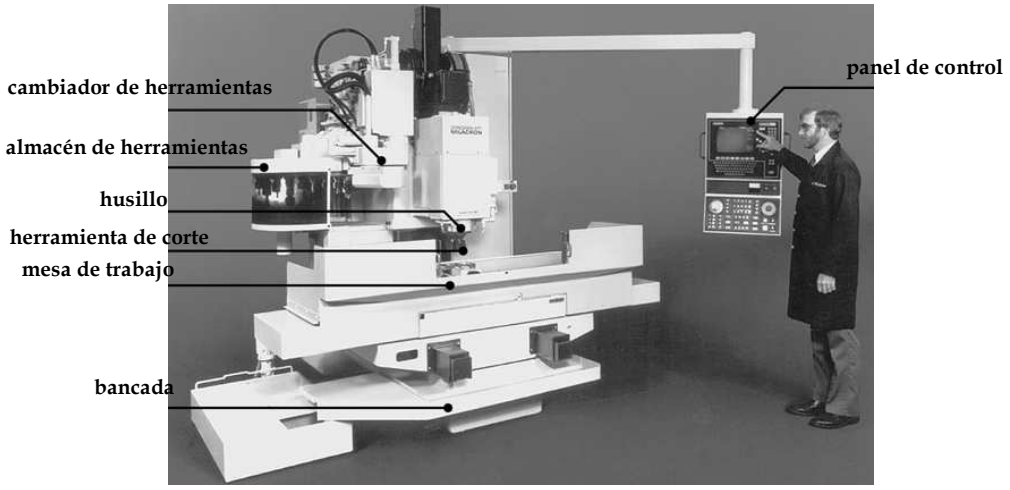



**Figura 152. Centro de mecanizado de husillo vertical.** **(Fuente [1])**

- *Centros de mecanizado "de husillo horizontal" u "horizontales"*: adecuados para piezas de trabajo grandes y altas. El pallet se puede girar en diferentes ejes, permitiendo diferentes posiciones angulares de la pieza de trabajo. Una variante:
    - *Centros de torneado*: son tornos controlados por ordenador, con la diferencia frente a un torno convencional que incorporan una o varias torretas porta-herramientas con herramientas de corte giratorias (combinación de operaciones de torno convencional y el trabajo con herramientas giratorias).

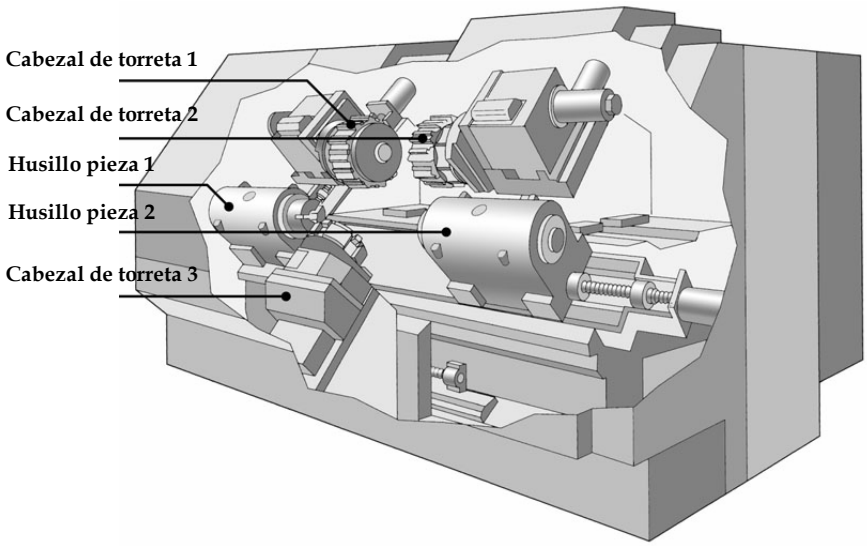



**Figura 153. Centro de torneado CNC.** **(Fuente [1])**

- *Centros universales de mecanizado*: equipados con husillos verticales y horizontales.

## 5.4 Características de los Centros de Mecanizado

- Capacidad de manejar diferentes tamaños y formas de piezas.
- Alta precisión dimensional y tolerancias (±2.5 μm).
- Muy versátiles, gran capacidad de cambiar de un tipo de pieza (producto) a otro.
- Bajo tiempo de carga y descarga de piezas.
- Reducido tiempo de cambio de herramientas.
- Reducido tiempo de calibración.
- Alta productividad.
- Menor necesidad de mano de obra.
- Optimiza costes de producción.
- Capacidad de monitorización de las condiciones de las herramientas (desgaste, rotura…), incluye sondas o palpadores para medir y compensar el desgate y posición de las herramientas.
- Permiten el calibrado e inspección de las piezas de trabajo antes, durante y después del proceso.
- Son compactas y altamente automatizadas (sistemas de control avanzado), un mismo operador puede manejar varios centros de mecanizado al mismo tiempo.
- Por lo general:
    - Velocidades máximas de giro de los husillos entre 4000 a 8000 rpm, hasta 75000 rpm en operaciones especiales (con herramientas de corte pequeñas).
    - Capacidad de trabajo con piezas de hasta 7000 kg.

- **Principal inconveniente:** la generación de grandes cantidades de viruta. Este tipo de máquinas deben estar equipadas con algún sistema recolector de virutas (tornillo sinfín o cadenas transportadoras).

- **Justificación de su uso**: dado su alto coste (en torno a 1 millón), se requiere que haya la suficiente demanda de trabajo (más de un turno por día).

- **Selección del tipo de centro de mecanizado:**
    - Tipo de productos, tamaño y complejidad de la forma.
    - Tipo de operaciones, tipo y cantidad de herramientas.
    - Precisión dimensional.
    - Capacidad de producción.

## 5.5 Máquinas de tipo Hexápodo

En el desarrollo de las máquinas-herramienta se busca:

- Flexibilidad.
- Aumentar la envolvente o volumen de trabajo.
- Ligereza.

Surgieron un tipo de máquinas-herramienta muy innovadoras dentro de una estructura de marco independiente octaédrico (ocho lados), conocidas como de tipo **hexápodo**. Son máquinas con uniones cinemáticas paralelas, basadas en el mecanismo conocido como *plataforma Stewart*. Su principal ventaja es que las uniones en la máquina sufren cargas axiales; los esfuerzos de flexión son mínimos, dando lugar a una estructura extremadamente rígida.

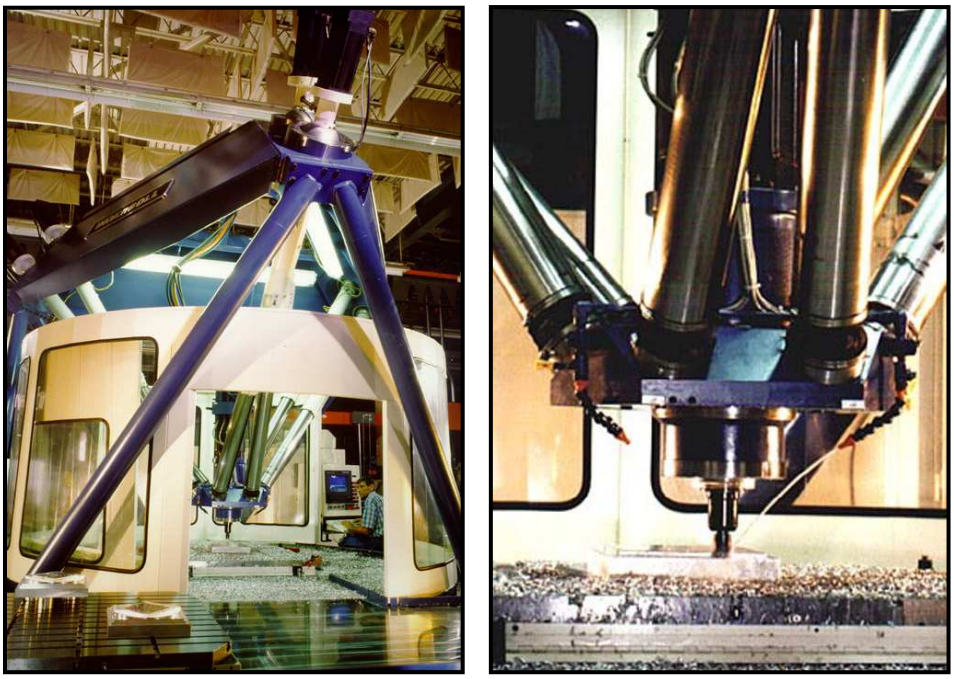


**Figura 154. Máquina-herramienta tipo hexápodo. (Fuente [1])**

La pieza de trabajo se monta sobre una mesa fija. Se utilizan tres pares de tubos telescópicos o patas, cada uno con su propio motor y equipado con tornillos sinfín de bolas, para maniobrar un portaherramientas rotatorio de la herramienta de corte. El controlador de la máquina acorta algunos tubos y extiende otros, de manera que la herramienta situada en la plataforma sujeta por los tres pares de tubos puede seguir la trayectoria fijada sobre la pieza de trabajo. En esta máquina tenemos 6 grados de libertad (3 lineales y 3 giratorios). Cada movimiento de la herramienta (aunque sea lineal) implica el cambio de longitudes de los seis tubos, con movimientos rápidos. Estos movimientos se traducen en altas aceleraciones y desaceleraciones, con grandes fuerzas de inercia.

Características:

- Alta rigidez.
- Menos masivas que los centros de mecanizado (con menos de una tercera parte de componentes).
- Gran envolvente o volumen de trabajo.
- Capacidad de mantener la herramienta siempre perpendicular a la pieza de trabajo (para cualquier forma o geometría).

- Alta flexibilidad (6 grados de libertad) para poder trabajar una pieza de trabajo en diferentes superficies y con diferentes formas, sin necesidad de cambiar la posición de la pieza de trabajo sobre la mesa de la máquina.
- Facilidad de transporte de la máquina (casi portátiles).

# 6 TEMA 6: SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE

## 6.1 Introducción

Los sistemas de Fabricación Flexible son aquellos en los que quedan integradas diferentes celdas flexibles de fabricación, todo ello gracias al uso del control por ordenador y las redes de comunicación.

Las máquinas, herramientas y operaciones de fabricación adquieren una flexibilidad incorporada → Sistemas Flexibles de Fabricación.

Como resultado, el sistema es capaz de responder a los cambios en las demandas del mercado (cambios de tipo de producto) y, además, permite asegurar la entrega a tiempo de los pedidos (sistemas "Justo a Tiempo").

Gracias al uso de técnicas CAD/CAM y de prototipado rápido se consigue reducir el tiempo de respuesta ante cambios de demanda en el mercado (lanzamientos de nuevos productos).

**Sistemas Flexibles de Fabricación (FMS):** integra todos los elementos característicos de un sistema de fabricación altamente automatizado. Este tipo de sistemas se desarrollaron a principios de la década de 1960. Están formados por diferentes Celdas de Fabricación Flexibles, con Robots Industriales que dan servicio a diferentes Centros de Mecanizado; consta además de un sistema de gestión automatizado de materiales; todo ello conectado o centralizado mediante un ordenador central.

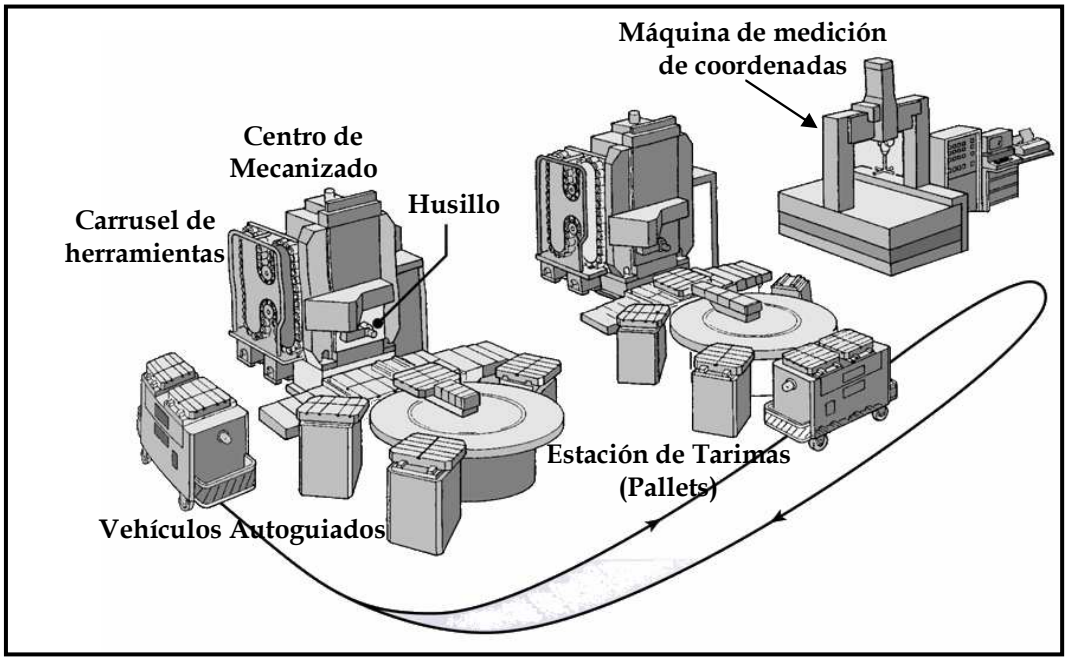



**Figura 155. Esquema de un Sistema Flexible de Fabricación.** **(Fuente [1])**

En este tipo de sistemas se puede gestionar las diferentes partes por separado para cada una de las estaciones de trabajo. El sistema puede gestionar la fabricación de un gran número de piezas diferentes y obtenerlas en cualquier orden. El sistema de control central permite optimizar todo el proceso en base de ir optimizando cada una de las operaciones individualmente. Las máquinas no

suelen estar organizadas por líneas (avance de piezas lineal), sino que las piezas pueden desplazarse de una máquina a otra según las necesidades en cada caso.

Las operaciones más comunes son:

- Uno o más procesos de mecanizado, rectificado, corte, formado, metalurgia de polvos, tratamiento térmico y acabado.
- Manejo de materias primas.
- Medición en inspección (control de calidad).
- Ensamblado.

Los Sistemas Flexibles de Fabricación combinan:

- La alta productividad de sistemas de fabricación del tipo "Líneas de Transferencia", muy poco flexibles.
- La flexibilidad del trabajo en taller.

Los Sistemas de Fabricación Flexible permiten que la producción para una serie limitada de piezas obtenga las ventajas características de la fabricación de grandes series (como por ejemplo las Líneas de Transferencia). En la siguiente tabla se muestran las principales características de un Sistema Flexible de Fabricación, teniendo como referencia las características de una Línea de Transferencia.

**Tabla 9. Comparación de características generales de Líneas de Transferencia y Sistemas Flexibles de Fabricación.** (Fuente [1])

| | Línea de Transferencia | Sistema Flexible de Fabricación |
|---|---|---|
| Variedad de Piezas | Poca | Infinita |
| Tamaño del lote | >100 | 1-50 |
| Tiempo de cambio de pieza | Alto | Muy bajo |
| Cambio de herramienta | Alto – Manual | Automático |
| Control adaptable | Difícil | Disponible |
| Inventario | Alto | Bajo |
| Producción durante mantenimiento | Ninguna | Parcial |
| Justificación de gasto de capital | Simple | Difícil |

En un Sistema de Fabricación Flexible:

- Las piezas se pueden producir de forma aleatoria y en tamaños de lote reducidos (hasta de una unidad y con un coste unitario inferior que en otros sistemas).
- Se reduce o elimina la mano de obra directa y los inventarios.
- El tiempo para el cambio de producto es bajo.
- Calidad de producción uniforme (incorpora sistemas de control que permiten ajustar el proceso productivo durante el mismo).

Principales elementos o componentes de un Sistema de Fabricación Flexible:

- Estaciones de Trabajo y Celdas Flexibles (centros de mecanizado de tres a cinco ejes; fresadoras, taladradoras y rectificadoras; equipos de inspección; ensamblaje; limpieza; formado de láminas; troquelado; cizallado; forjado; hornos; prensas; tratamientos térmicos…).

- Manejo y Transporte Automatizado de materiales y piezas (vehículos guiados; bandas transportadoras; mecanismos de transferencia; pallets).
- Sistema de Control.

**Algunas Consideraciones:**

- Las máquinas no deben permanecer inactivas (elevada inversión). Se requiere una adecuada planificación de los procesos. **Calendarización Dinámica** (capacidad de responder a cambios rápidos de demanda).
- **Se debe justificar la inversión en base a:**
    - Mejora la competitividad.
    - Mejora la calidad.
    - Reduce los costes.
    - Aumenta la variedad de piezas a fabricar.
    - Reduce el tamaño de los lotes.
    - Reduce los tiempos de reacción.
    - Reduce los tiempos de recorrido.
    - Reduce las existencias (Just in Time).
    - Mejor aprovechamiento de las máquinas y los medios de servicio.

**Otros aspectos a destacar de un Sistema de Fabricación Flexible:**

- Eliminación del gasto no estrictamente necesario (automatización, reducción mano de obra, aumento utilización de equipos, fuera stocks - just in time).
- Reducción de los tiempos de preparación y de espera.
- Estudio de procesos.
- Estandarización
- Automatización de los procesos.
- Aumento de la producción global.

**¿Qué cosas se han ido desarrollando para hacer posible los Sistemas de Fabricación Flexibles?**

- Mecanizado CNC.
- Cambio automático de piezas (pallets).
- Cambio automático de herramientas.
- Transporte automático de piezas entre máquinas (pallets, vehículos autoguiados,…)
- Identificación de piezas y herramientas.
- Auto-corrección de desviaciones (verificación de cotas en piezas y corrección de los parámetros del proceso de forma automática).
- Gestión de máquinas, materiales y herramientas (Bases de datos, software de control).

**Algunas definiciones**

**- Línea de Fabricación Flexible:**

Varias máquinas CNC o células flexibles, se relacionan entre sí mediante un sistema de transporte de piezas e identificación de las mismas. Cada máquina dispone de una línea de almacenes de piezas y de herramientas automatizadas. En cada máquina se permite la entrada aleatoria de una gran diversidad de piezas. El ordenador central gestiona el trabajo de cada máquina, asignando a cada pieza la máquina más adecuada. El ordenador que coordina la línea realiza también funciones de planificación y programación de la producción.

**- Taller Flexible:**

La recepción, inspección, almacenaje, transporte, mecanización, verificación, montaje, inspección y distribución, están totalmente automatizados y coordinados por un ordenador central y otros ordenadores satélites para cada función o taller.

## 6.2 Automatización en Sistemas de Fabricación

Podemos considerar como automatizable (NO TODO ES AUTOMATIZABLE):

- Tareas iterativas donde se realice siempre la misma operación o sean operaciones muy similares.
- Tareas muy complejas, imposibles de realizar por un operario experto.

Ante esta situación, con tareas potencialmente automatizables, se debe plantear la posibilidad de incorporar en cualquier sistema de fabricación cierto grado de automatización:

- Automatización rígida: diseñada para realizar una serie de tareas limitadas.
- Automatización programable: permite realizar diferentes tareas mediante la modificación del programa de control.
- Automatización Flexible: puede realizar tareas (llamando a diferentes programas) en función de información exterior predefinida. Inicialmente comenzó con el Control Adaptativo, es el escalón más alto de la automatización.

## 6.3 Sistema de Control en Sistemas de Fabricación Flexibles

Componentes físicos:

- Control de entradas y salidas (Digitales/Analógicas) para la comunicación con su entorno (máquinas, sensores y manipuladores).
    - Pequeño: 8-10 entradas/salidas.
    - Mediano: 50-200 entradas/salidas.
    - Muy sofisticados: 10.000 entradas/salidas.
- **Sus componentes deben estar diseñados para soportar las condiciones de trabajo (vibraciones, altas temperaturas, polvo y suciedad…):**
    - Fuente de alimentación.
    - Memorias.
    - Interfaces.
    - Unidad central de proceso (ubicación del programa; recibe señales de entrada; envía señales de salida). Los programas suelen ser cíclicos.
        - Lectura de entradas.
        - Operaciones lógicas (programa)
        - Volcado de salidas
    - Entradas/Salidas

## 6.4 Sistema de Manipulación en Sistemas de Fabricación Flexibles

**Sensores**: encargados de enviar información al ordenador central (células fotoeléctricas, sensores de presión, de posición, de temperatura…).

**Manejo y Transporte Automatizado de materiales y piezas**: actuadotes neumáticos, cintas transportadoras, rodillos o cadenas, robots, monorraíles, vehículos autoguiados (guiado óptico, radio guiado, navegación automática), incluso las propias máquinas de fabricación pueden hacer funciones de manejo y transporte.

El sistema de transporte debe garantizar el movimiento de piezas entre las máquinas y los almacenes. Debe:

- Capaz, Fiable y con acceso aleatorio.
- Seguridad.
- Coste y capacidad de adaptación.
- Garantizar exactitud de mecanizado, posicionamiento y orientación.
- Posibilidad de recorridos de espera.
- Manejo sencillo.
- Posibilidad de ampliación y complementación.
- Mantenimiento y servicio sin interrupción de proceso.

Clasificación de los sistemas de manipulación:

- Sistemas eléctricos: los más versátiles. Basado en el motor eléctrico (rotacional):
    - Corriente alterna (robustos y potentes).
    - Corriente continua (menos potentes, más fácil controlar su velocidad).
    - Paso a paso (muy sencillos, económicos y fáciles de controlar)
- Sistemas neumáticos: los más usados. Sencillos de montar y más baratos que los eléctricos. Menor riesgo ambiental. Pueden llegar a realizar operaciones de control "Lógica Neumática".
- Sistemas hidráulicos: para mover objetos pesados con mucha precisión.
- Sistemas mecánicos.

Debe existir algún sistema que permita la **identificación y seguimiento** de los materiales a lo largo de todo el proceso productivo:

- Ópticos. Códigos de barras. Identificación de caracteres. Reconocimiento de formas. Magnéticos. Tarjetas magnéticas.
- Cápsulas (de código fijo o de código programable). Se necesita la correspondiente unidad lectora de dicha cápsula. Las de código fijo almacenan un número; las de código programable permiten almacenar más información.

Almacenes: eliminación de almacenes (Just in time), eliminación de stocks (tanto de productos terminados como de productos en curso o materia prima)

## 6.5 Las máquinas en Sistemas de Fabricación Flexibles

¿Cómo deben ser las máquinas?

- Flexibles.
- Capaces de realizar más de una operación elemental de mecanizado, objetivo final de poder realizar el mecanizado completo de una pieza en una única celda o máquina de trabajo.
- Permitir realizar correcciones térmicas: disponer de sensores de temperatura para la herramienta y la estructura de la máquina, pudiendo corregir automáticamente las desviaciones por dilataciones térmicas.
- Deben incorporar sistemas de detección de posición y velocidad: captadores de posición que determinen con precisión la posición de la herramienta con respecto a la pieza:
    - Captadores de posición:
        - Analógicos o digitales (depende de que la señal sea continua o discreta respecto de la dimensión a medir)
        - Absolutos o incrementales (dependen de si la señal que proporciona está relacionada de manera unívoca con la posición, o si el campo de medida está dividido en pasos o incrementos de longitud).
        - Directos o indirectos (depende de la situación del captador con respecto a la dimensión que queramos medir, pueden captar directamente la posición del elemento a medir, o captar la posición de otro elemento que está unido cinemáticamente con el elemento del que queremos conocer su posición).
        - Lineales o rotativos.
    - Captadores de velocidad: Dinamo Taquimétrica.

Manejo de las herramientas por parte de las celdas flexibles (máquinas):

- Deben permitir la codificación de las herramientas: cápsulas de código fijo, cápsulas de código programable, código de barras…
- Deben existir estaciones para el reglaje de las herramientas. El reglaje se refiere a determinar las dimensiones exactas de las herramientas para poder realizar las correcciones oportunas en el código del mecanizado o del trabajo. Estas estaciones de reglaje son independientes de las máquinas o celdas flexibles.
- Cambio automático de herramientas y control automático del desgaste o rotura para sustituirla. Almacén de herramientas en la misma máquina.

En cuanto al manejo de las piezas por parte de la máquina:

- Carga y descarga automática de piezas (pallets).
- Control automático de dimensiones que permite auto-corregir las desviaciones programadas.
- Funciones auxiliares: sistemas de refrigeración y lubricación, evacuación de viruta, limpieza de piezas y máquinas, todo automático.

A destacar:

- La calidad no se controla, se fabrica.
- **Mantenimiento de los sistemas de fabricación:**
    - Preventivo:
        - Sustituir componentes en intervalos fijos, antes de que falle.
        - Sustituir componentes en función de inspecciones periódicas.
    - Correctivo:
        - Previsible o planificado, sustitución de componentes menos importantes cuando fallan.
        - No previsible o no previsto (EVITAR).

Por otro lado deben existir máquinas de medición de coordenadas tridimensionales con CNC que permitan la verificación de las piezas acabadas o semi-acabadas. Este tipo de máquinas pueden estar dotadas con los mismos medios de suministro de piezas (transporte de piezas, pallets, identificación de piezas) que el resto de máquinas.

**¿Cómo saber si necesitamos un Sistema de Fabricación Flexible?**

- Si tenemos piezas similares, tamaños de lote medianos y relativamente grandes → en este caso podría no ser necesario tener máquinas-herramientas encadenadas, bastaría con disponer de almacenes intermedios para las piezas en curso. En este caso, al tener piezas similares no sería necesaria la flexibilidad de este tipo de sistemas. Al tener tamaños de lote medianos o grandes, podría ser más adecuado irnos a un sistema de fabricación más productivo, aunque menos flexible (automatización más rígida: líneas de flujo convencional, líneas de transferencia)

- Producción lotes medianos de piezas diferentes → en este caso tenemos piezas diferentes, por lo que necesitamos cierta flexibilidad, pero trabajamos con lotes medianos. En este caso podría ser suficiente con centros de mecanizado autónomos.

- Fabricación de varias piezas distintas, tamaños de lote pequeños y los modelos varían constantemente → en este caso si se requiere de la flexibilidad que aporta un Sistema de Fabricación Flexible.

**A la hora de seleccionar un tipo u otro de celda flexible de trabajo, ¿qué criterios o características debemos considerar?**

- Características generales de la máquina:
  - Tipo de máquina.
  - Nº de ejes.
  - Nº de ejes controlados simultáneamente.
  - Velocidad de trabajo.
  - Potencias en cada eje.
  - Precisión y repetibilidad.
  - Volumen de trabajo.
- Características desde el punto de vista de las herramientas:
  - Capacidad del almacén.
  - Tiempo de cambio.
  - Detección de rotura automático.
  - Control de desgaste.
  - Tipo de identificación para cada herramienta.
  - Acoplamientos.
- Características desde el punto de vista de las piezas:
  - Dimensiones y pesos que debemos manejar.
  - Tiempo de cambio de pieza.
  - Previsión del posicionado.
  - Capacidad del almacén.
  - Medición en máquina.
- Otras consideraciones:
  - Evacuación de viruta.
  - Refrigeración.
  - Mantenimiento preventivo.
  - Auto-diagnostico.
  - Acceso a la máquina.
  - Seguridad.

# 7 TEMA 7: SOLDADURA

## 7.1 Introducción

Una gran mayoría de los productos que podemos encontrar a nuestro alrededor se obtienen mediante el ensamblado de componentes fabricados como piezas individuales. Incluso productos muy sencillos constan de, al menos, dos componentes. Por ejemplo, un martillo (mango de madera y cabeza generalmente de metal). En piezas más complejas el número de componente puede ir desde 300 partes (una podadora), 12000 partes (un piano de cola) a 6 millones de partes (un avión Boeing 747-400).

La unión de componentes es un proceso que incluye: soldadura, unión con adhesivos y unión mecánica. El ensamble de componentes puede ser necesario porque:

- Sea imposible fabricar la pieza con un solo componente, por sencilla que sea.
- Sea más económico fabricar el producto con varios componentes.
- Sea conveniente tener diferentes componentes por motivos de mantenimiento (permita el reemplazo de componentes averiados).
- Por motivos funcionales sea conveniente tener componentes de diferentes materiales.
- Sea preferible el transporte de los componentes hasta el cliente (quien procede al ensamble).

**Figura 156. Soldadura por puntos en carrocerías de automóviles. (Fuente [1])**

Clasificación de uniones según "American Welding Society (AWS)":

- **Soldadura:** "Soldadura por fusión"; "Soldadura de estado sólido"; "Soldadura Fuerte"; "Soldadura Blanda".
- **Unión con adhesivos**.
- **Sujeción mecánica**.

**Clasificación de los procesos de soldadura:**

- **Soldadura por Fusión:** proceso en el que se produce la fusión del metal base y del metal de aportación (si se usa). Siempre existe una fase líquida formada por el metal base o por el metal base + el metal de aportación.

- **Soldadura en Estado Sólido:** no se produce la fusión del metal base ni la del metal de aportación (si se usa). Nunca existe una fase líquida.

- **Soldadura Fuerte o Blanda:** siempre se produce la fusión del metal de aportación, pero no la fusión del metal base. Siempre existe una fase líquida formada por el metal de aportación. Fuerte (por encima de 450ºC) – Blando (por debajo de 450ºC).

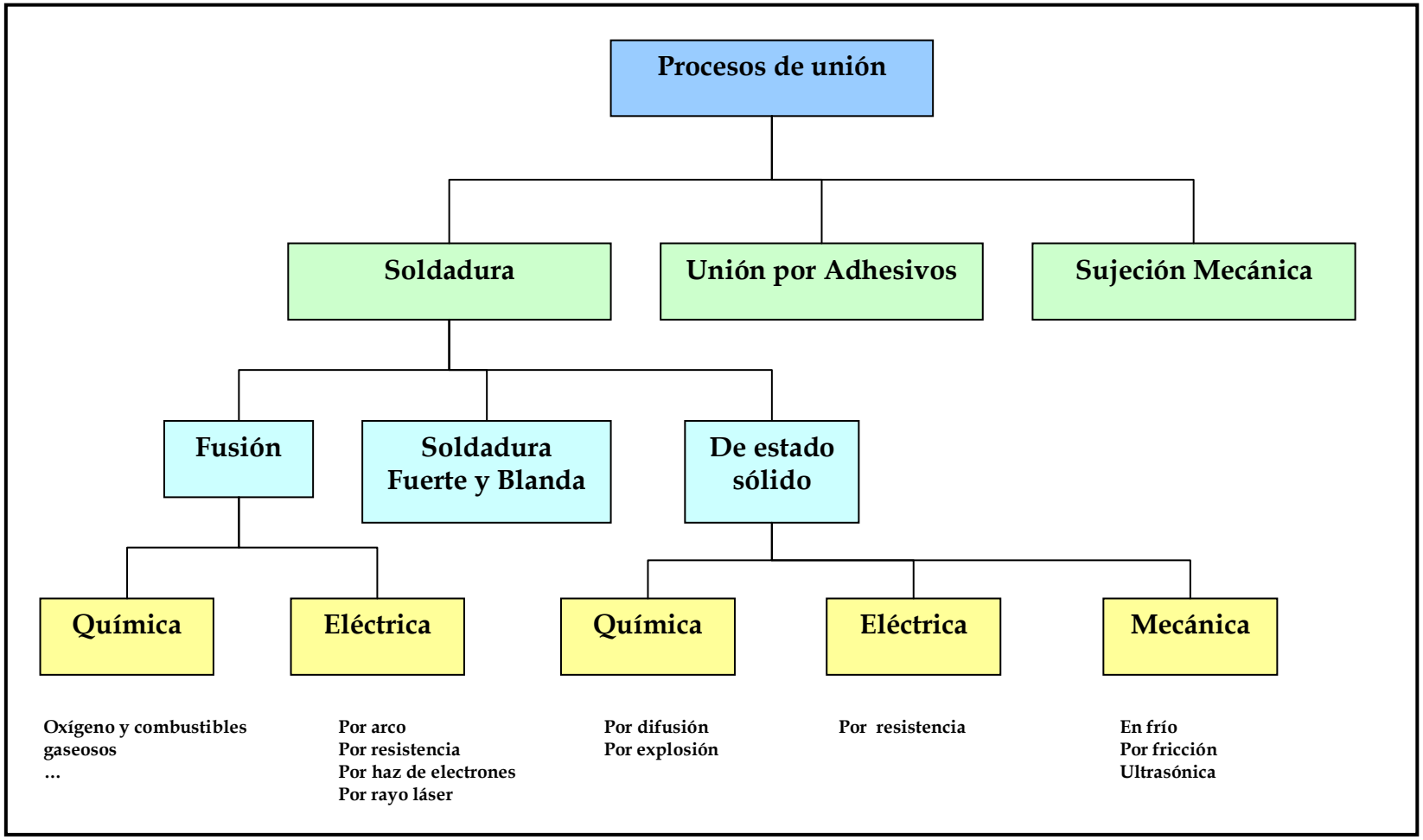



**Figura 157. Esquema clasificación de tipos de uniones.** **(Fuente [1])**

**Soldadura:** unión continua y homogénea, a nivel local o global, de materiales con o sin aplicación directa de calor, y con o sin la adición de material de aportación. Proceso de unión por coalescencia.

## 7.2 Soldadura por Fusión

**Soldadura por fusión:** fusión y coalescencia ("propiedad de las cosas de unirse o fundirse") de materiales mediante calor. Se pueden utilizar materiales de *aporte* (agregados en la zona de soldadura). Si no se utilizan materiales de aporte se denomina *soldadura autógena*.

### 7.2.1 Soldadura con oxígeno y combustibles gaseosos

La *soldadura con oxígeno y combustibles gaseosos (OFW)* hace referencia a cualquier soldadura que utilice un gas combustible combinado con oxígeno para producir una llama (fuente de calor para fundir los metales). Se puede utilizar para la mayoría de metales (hasta 6 mm de espesor aprox.).

El proceso más común es la *soldadura con oxiacetileno (OAW)* que emplea acetileno ($C_2H_2$) como combustible (Fig. 159). Muy usada en fabricación de láminas metálicas estructurales, carrocerías de automóviles… Se pueden usar otros gases combustibles (hidrógeno…), pero se obtienen temperaturas más bajas.

Con oxígeno y acetileno se producen dos reacciones químicas:

**1.** Combustión primaria (llama primaria) → $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2 + \text{calor}$

**2.** Combustión secundaria (llama secundaria) → $2CO + H_2 + 1.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O + \text{calor}$

La combustión primaria genera casi la tercera parte de todo el calor producido. Se pueden alcanzar hasta 3300ºC en la llama primaria.

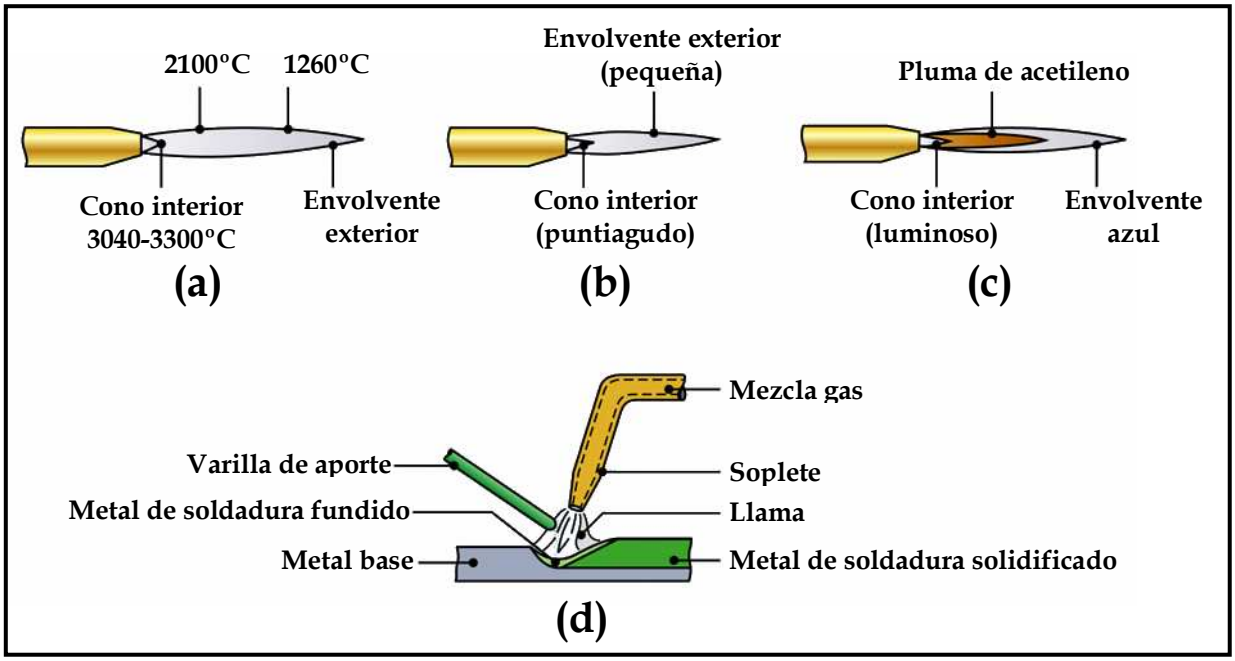



**Figura 158. Tipos de llama de oxiacetileno: neutra (a); oxidante (b); carburante (c). Esquema de soldadura con llama de oxiacetileno. (Fuente [1])**

Un aspecto muy importante en la soldadura con oxiacetileno es la relación entre el oxígeno y el acetileno en la llama.

**Llama neutra (Fig. 158a)**: relación 1:1.

**Llama oxidante (Fig. 158b)**: dañina para aceros y otros metales por oxidación; adecuada para cobre y sus aleaciones al formar una capa protectora *"escoria"* (compuestos de la oxidación).

**Llama carburante (Fig. 158c)**: el oxígeno no es suficiente para quemar todo el acetileno, se alcanza menor temperatura. Adecuado para casos en los que se requiera menos calor (soldadura fuerte o blanda, trabajos de endurecimiento).

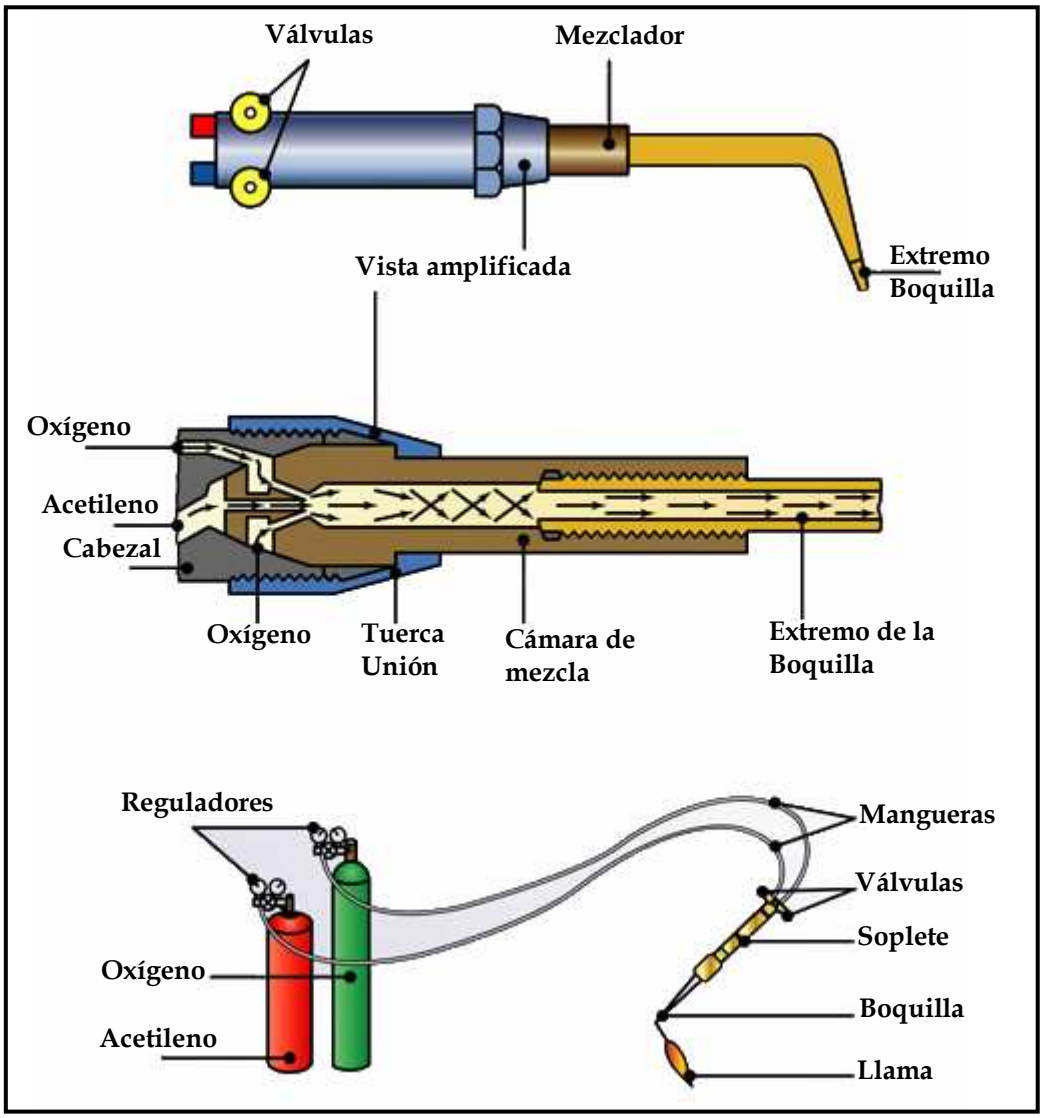



**Figura 159. Equipo de soldadura por oxiacetileno.** (Fuente [1])

**Retroceso de la llama:** la llama puede retroceder al interior del soplete por diferentes motivos:

- Momentáneos: la llama retrocede al interior del soplete, se apaga por un momento y vuelve a encenderse. Puede producirse por estar la boquilla obstruida, tener la válvula anti-retorno averiada o por tener el orificio de la boquilla agrandado.
- Sostenido: la llama retrocede y sigue quemándose en el interior del soplete. Puede producirse por tener temperaturas muy altas en la cámara de mezclado del soplete o por tener volúmenes muy altos de gases. Si esto se produce debemos cerrar primero la entrada de oxígeno, luego el acetileno, enfriar el soplete con agua y examinar el equipo.
- Total: la llama retrocede y llega hasta las mangueras que conectan las bombonas de gases, pudiendo producir la explosión de las mismas. Puede producirse por obstrucciones en la boquilla, tamaño de la boquilla muy pequeño o dejar abiertas las válvulas del soplete al terminar un trabajo y cerrar los reguladores de las botellas.

**Metales de aporte:** se utilizan para aportar material adicional en la zona de la soldadura. Se denominan *varillas de aporte o alambre*. Pueden ser desnudas o recubiertas de fundente.

**Fundente:** retarda la oxidación de las superficies de las partes que se estén soldando (protección gaseosa). Ayuda a disolver y eliminar los óxidos y otras sustancias de la zona de soldado. Favorece una unión más consistente. Toda la escoria que se forma protege la superficie de los metales fundidos contra la oxidación mientras se enfría.

Las uniones pequeñas pueden hacerse con un único cordón de soldadura. Para soldaduras con ranuras en V se realizan varios cordones (pasos), ante de aplicar un nuevo cordón es necesario limpiar la superficie del anterior.

**Soldadura con gas a presión:** variante de la soldadura por oxiacetileno, en este caso se utiliza la llama para calentar las piezas a unir. Cuando comienza a fundirse la zona de unión, se retira la llama y se aplica presión.

### 7.2.2 Soldadura por arco y electrodo no consumible

En este caso el calor requerido para la soldadura se obtiene de la energía eléctrica. Se produce un arco entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo, siendo necesaria una fuente de alimentación. Se alcanzan temperaturas de unos 30000ºC.

Como electrodo no consumible se suele utilizar el tungsteno. Dadas las altas temperaturas se debe proteger la zona de la soldadura con algún *gas inerte* que evite la oxidación de la pieza de trabajo (Fig. 160).

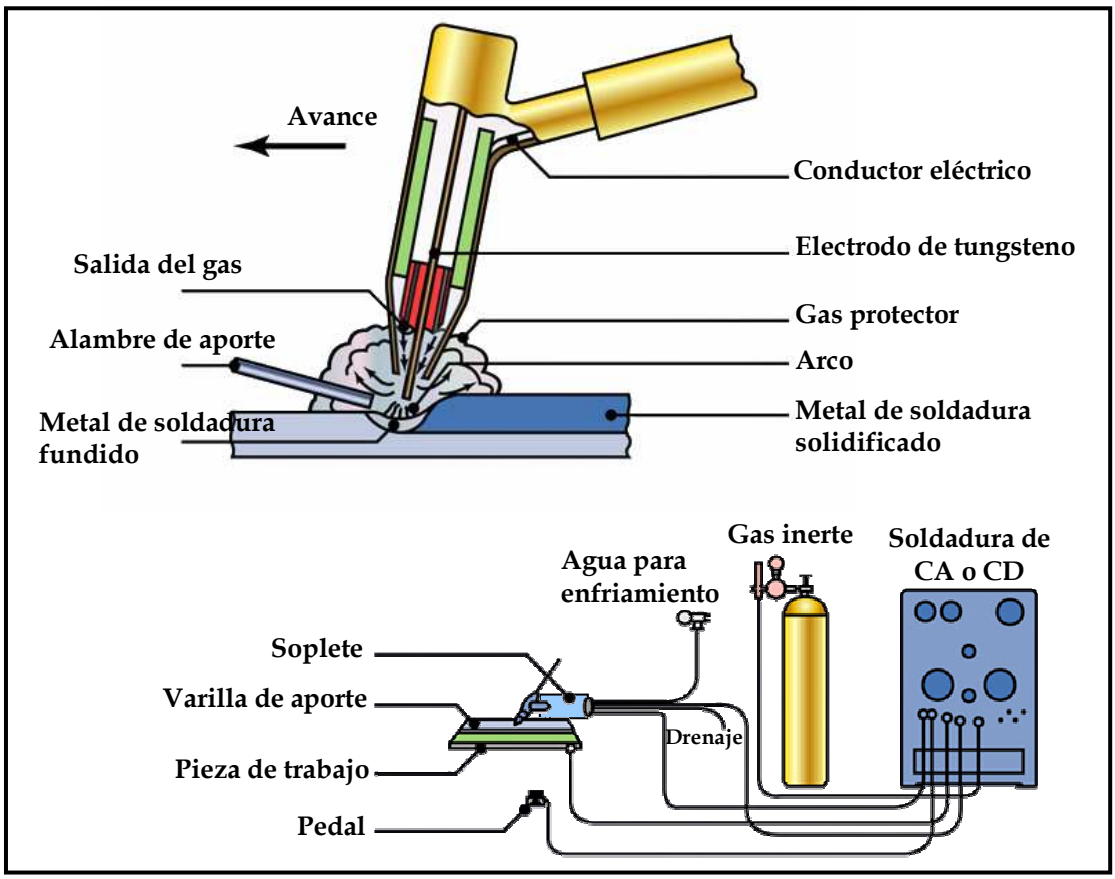



**Figura 160. Equipo de soldadura por arco de tungsteno y gas.** (Fuente [1])

Puede utilizarse:

- Corriente Directa. Su polaridad (dirección del flujo de la corriente):
  - Polaridad Directa (*corriente directa de electrodo negativo*), la pieza es el ánodo (positiva). Produce soldaduras profundas y estrechas.
  - Polaridad Inversa (*corriente directa de electrodo positivo*), la pieza es el cátodo (negativa). Presenta menor penetración de la soldadura pero mayor anchura.

Corriente Alterna: mayor rapidez; adecuado para secciones gruesas.

**Soldadura por arco de tungsteno y gas (GTAW o TIG):** el metal de aporte se suministra con una varilla o alambre. El electrodo no se consume, permite un arco estable. Metal de aporte similar al de la pieza de trabajo. No se utiliza fundente. El gas inerte de protección suele ser Argón o Helio, o una mezcla de ambos. Se utiliza para gran variedad de metales y aplicaciones (aluminio, magnesio, titanio y metales refractarios). Adecuado para metales delgados. El uso del gas incrementa el coste de la soldadura con respecto a otros tipos de soldadura que no requieren del uso de este tipo de gases de protección. Los equipos suelen ser portátiles.

**Soldadura por arco de plasma (PAW):** se produce por un arco de plasma dirigido a la zona de soldadura. El arco es estable, alcanza hasta 33000ºC.

**Plasma:** gas ionizado caliente, formado por cantidades casi iguales de electrones e iones positivos. El plasma se inicia entre el electrodo de tungsteno y el orificio de salida, mediante un arco piloto de baja corriente (Fig. 161). El arco de plasma se concentra porque se hace pasar por un orificio muy pequeño. El arco y la zona de soldadura se protegen con un anillo externo y gas inerte (argón, helio o mezcla).

Este tipo de soldadura presenta un arco más estable y mayor concentración de energía que otro tipo de soldaduras por arco. Permite soldaduras más profundas y estrechas.

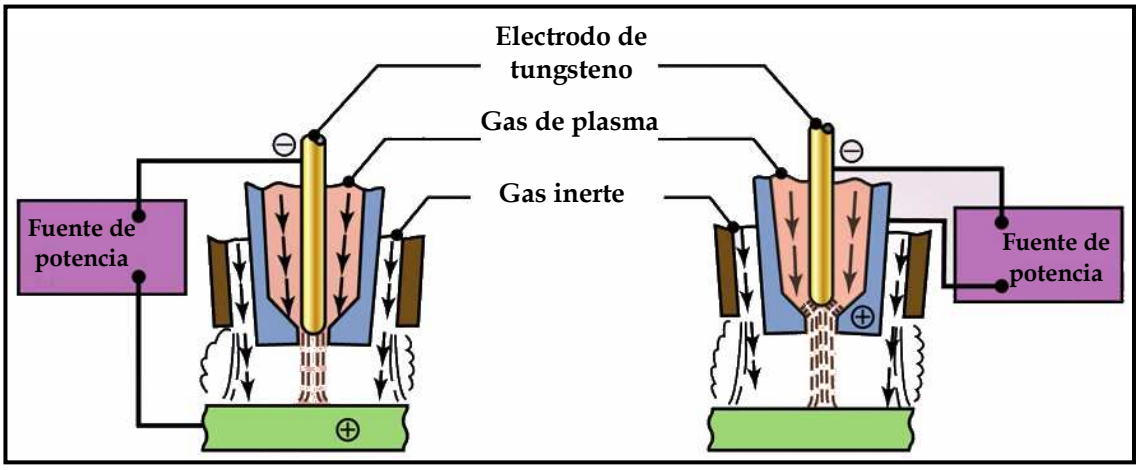



**Figura 161. Esquema de soldadura por arco de plasma. Transferido (izq.) la pieza forma parte del circuito eléctrico. No transferido (dcha.) la pieza no forma parte del circuito eléctrico. (Fuente [1])**

**Soldadura con hidrógeno activo (AHW):** se genera un arco entre dos electrodos de tungsteno en una atmósfera protectora de hidrógeno. El arco es, por tanto, independiente de la pieza de trabajo. Se alcanzan temperaturas superiores a los 6000ºC cerca del arco. El hidrógeno que se utiliza es $H_2$, cuando se acerca al arco se descompone en su forma atómica H absorbiendo calor del arco. Cuando ese hidrógeno H incide con la superficie relativamente fría del metal vuelve a su forma $H_2$ liberando rápidamente gran cantidad de calor. Este tipo de soldadura está en desuso a favor de la soldadura por arco y metal protegido.

### 7.2.3 Soldadura por arco y electrodo consumible

En este apartado se describen seis procesos diferentes de procesos de soldadura por arco y electrodo consumible.

**Soldadura con arco y metal protegido (SMAW) (soldadura con varilla):** uno de los métodos más antiguos, sencillos y versátiles. El arco se genera tocando la pieza de trabajo con la punta del *electrodo recubierto* (con forma de varilla) y retirándolo con rapidez, manteniendo la distancia suficiente para que el arco se mantenga (Fig. 162). La varilla se sostiene de forma manual.

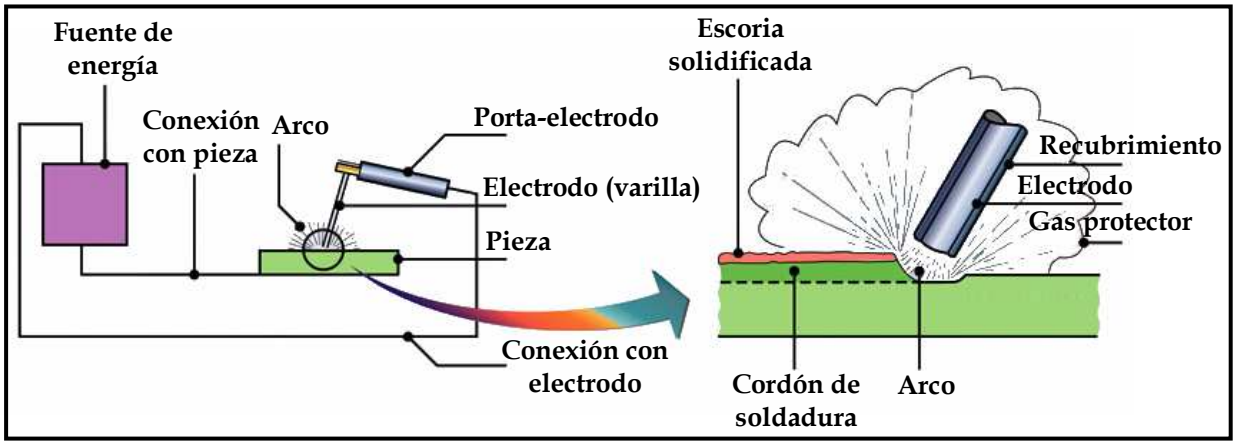



**Figura 162. Proceso de soldadura por arco y metal protegido.** (Fuente [1])

El calor generado funde parte del material de la pieza de trabajo, de la varilla y su recubrimiento; la mezcla de estos materiales forma la soldadura.

El recubrimiento: desoxida y produce una pantalla de gas que protege del oxígeno ambiente.

La corriente puede ser directa o alterna (de 50 a 300 A).

Es adecuado para espesores de 3 a 19 mm (se puede ampliar usando pases múltiples de soldadura). Al soldar con varias pasadas (Fig. 163) es necesario limpiar la escoria de cada cordón de soldadura antes de proceder a la siguiente pasada (la escora puede provocar corrosión).

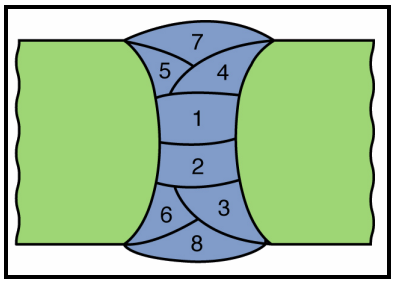



**Figura 163. Proceso de soldadura con ocho cordones individuales.** (Fuente [1])

**Soldadura con arco sumergido (SAW):** el arco se protege con un *fundente granular* (cal, sílice, óxido de manganeso, fluoruro de calcio y otros componentes). La capa de fundente cubre completamente el metal fundido (evita chispas, intensidad radiación ultravioleta y humos; aísla térmicamente); el fundente no utilizado se puede recuperar (tubo de recuperación) (Fig. 164).

Electrodo: rollo de alambre redondo desnudo (1.5 – 10 mm de diámetro). Es habitual la alimentación automática mediante una *pistola de soldar*. Corrientes de 300 a 2000 A. Líneas monofásicas o trifásicas de hasta 440 V. Proceso limitado a piezas horizontales (el fundente se alimenta por gravedad). Calidad de la soldadura muy alta, buena tenacidad, ductilidad y uniformidad.

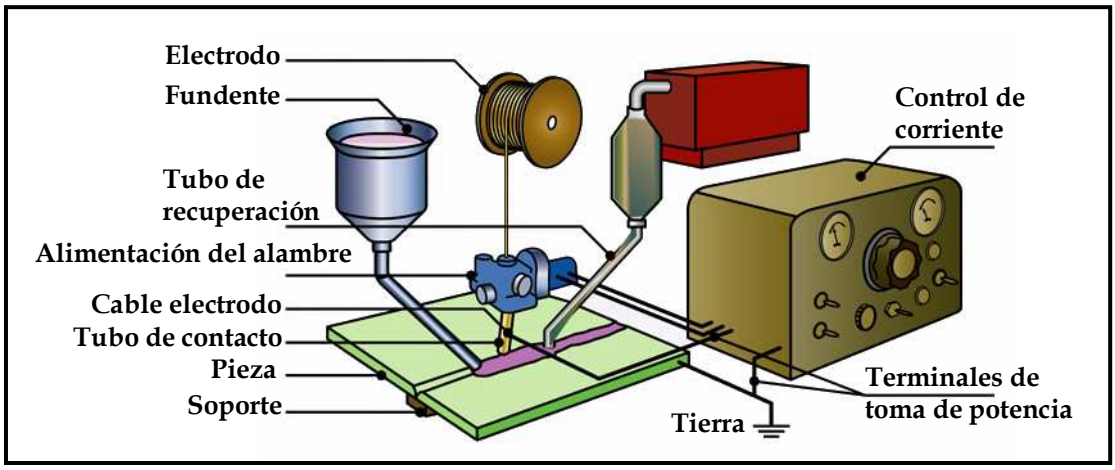



**Figura 164. Proceso de soldadura con arco sumergido.** (Fuente [1])

**Soldadura con arco metálico y gas inerte (GMAW - MIG):** la zona de trabajo se protege con gas inerte (argón, helio, dióxido de carbono u otras mezclas de gases). Un alambre desnudo consumible se alimenta de forma automática mediante una pistola o boquilla (Fig. 165). El metal del alambre suele incorporar compuestos que evitan la oxidación. Se alcanzan temperaturas relativamente bajas; el espesor máximo recomendado de la pieza de trabajo es de 6 mm.

Cuando se utiliza gas activo se denomina **MAG** ($CO_2$ o argón+$CO_2$).

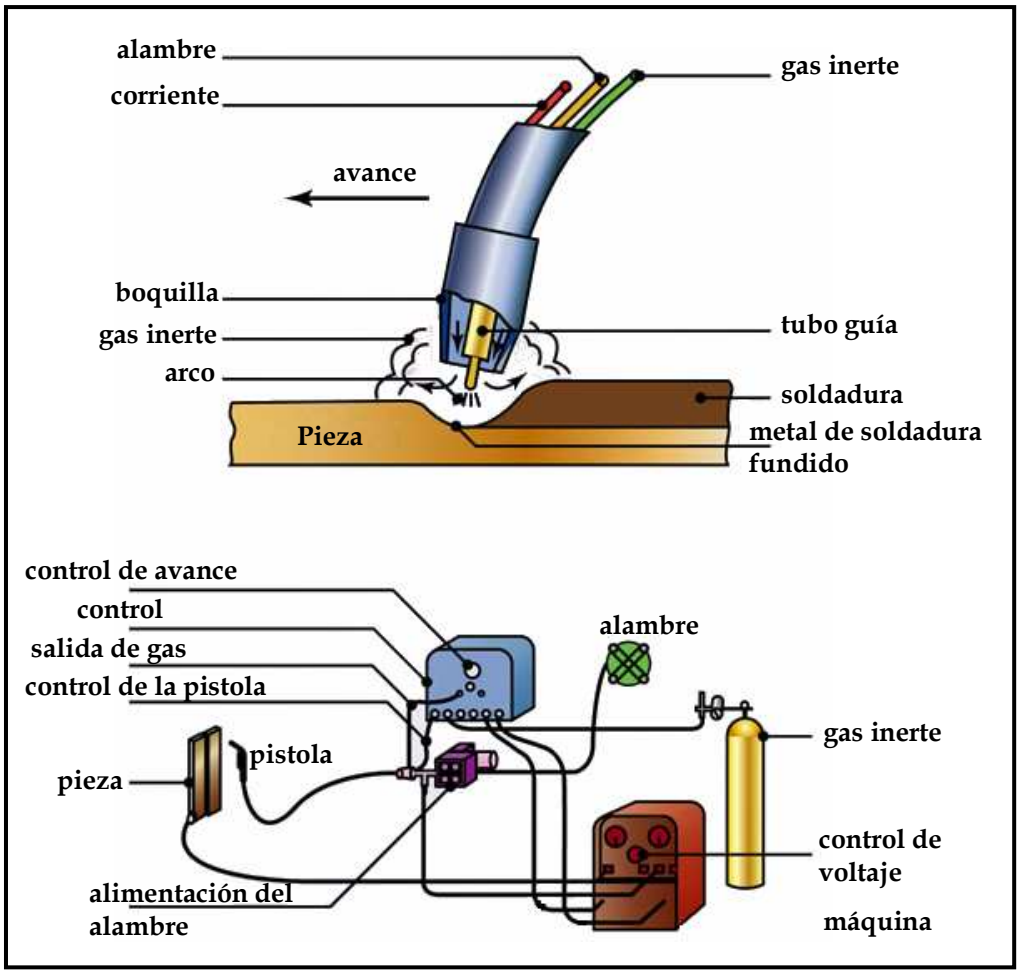



**Figura 165. Proceso de soldadura con arco metálico y gas inerte.** (Fuente [1])

**Soldadura con arco con núcleo fundente (FCAW):** similar a la soldadura MIG, excepto que el electrodo tiene forma tubular y está relleno con el fundente (Fig. 166). Produce un arco más estable y mejora las propiedades mecánicas del metal soldado. Se puede utilizar un fundente mucho más flexible que el fundente utilizado en la soldadura con varilla (más frágil). Los electrodos se pueden suministrar enrollados.

Se pueden utilizar electrodos que desprenden gases que protegen la soldadura. Los electrodos de diámetro reducido (0.5-4 mm de diámetro) hacen que este tipo de soldadura sea muy adecuado para piezas delgadas. Este proceso es muy versátil (igual que la soldadura con varilla) y además incorpora la alimentación automática del electrodo.

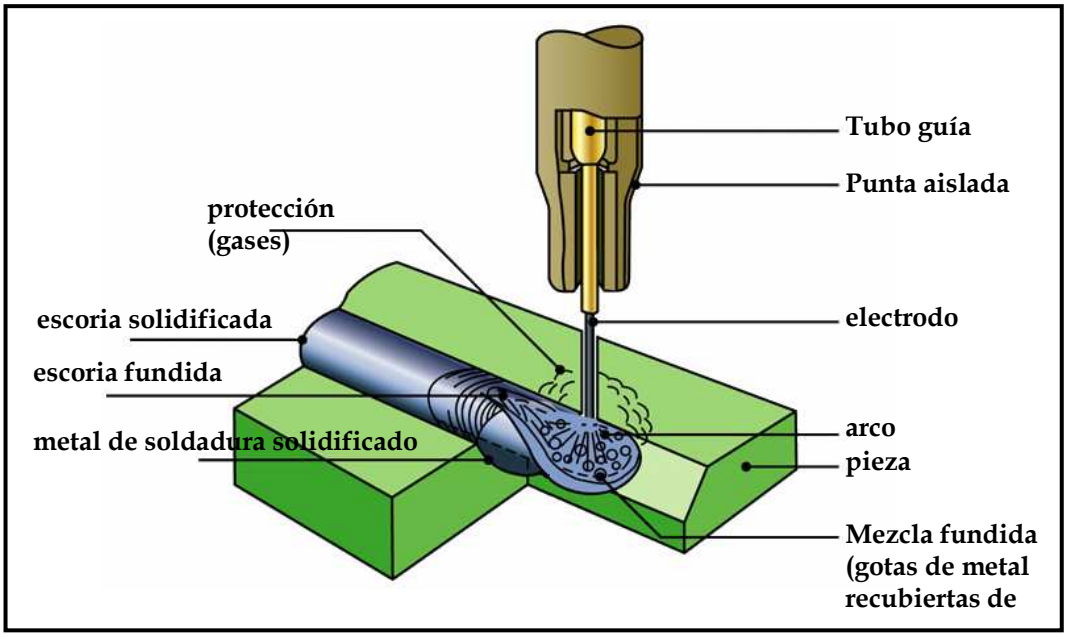



**Figura 166. Proceso de soldadura con arco con núcleo fundente. (Fuente [1])**

**Soldadura eléctrica por gas (EGW):** requiere un equipo especial (Fig. 167). Se utiliza para soldar extremos de piezas en sentido vertical y en un solo paso. Las piezas se colocan extremo con extremo (unión a tope). El metal de la soldadura se va depositando en la cavidad de soldadura (entre las piezas a unir). El espacio entre las piezas se cierra con dos zapatas de cobre (refrigeradas con agua).

Uno o varios electrodos se alimentan por un conducto, el arco se mantiene continuo con electrodos de núcleo fundente o sólidos. La soldadura se protege con gas inerte (dióxido de carbono, argón o helio).

**Soldadura con electroescoria (ESW):** muy similar a la soldadura EGW (Fig. 168). El arco se inicia entre el electrodo y el fondo de la pieza a soldar. Se agrega el fundente, que se funde por el calor producido en el arco. Cuando la escoria fundida llega a la punta del electrodo el arco se extingue. El calor se produce de forma continua por la resistencia eléctrica de la escoria fundida.

Se pueden llegar a soldar placas con espesores de 50 a 900 mm; la soldadura se hace en un paso.

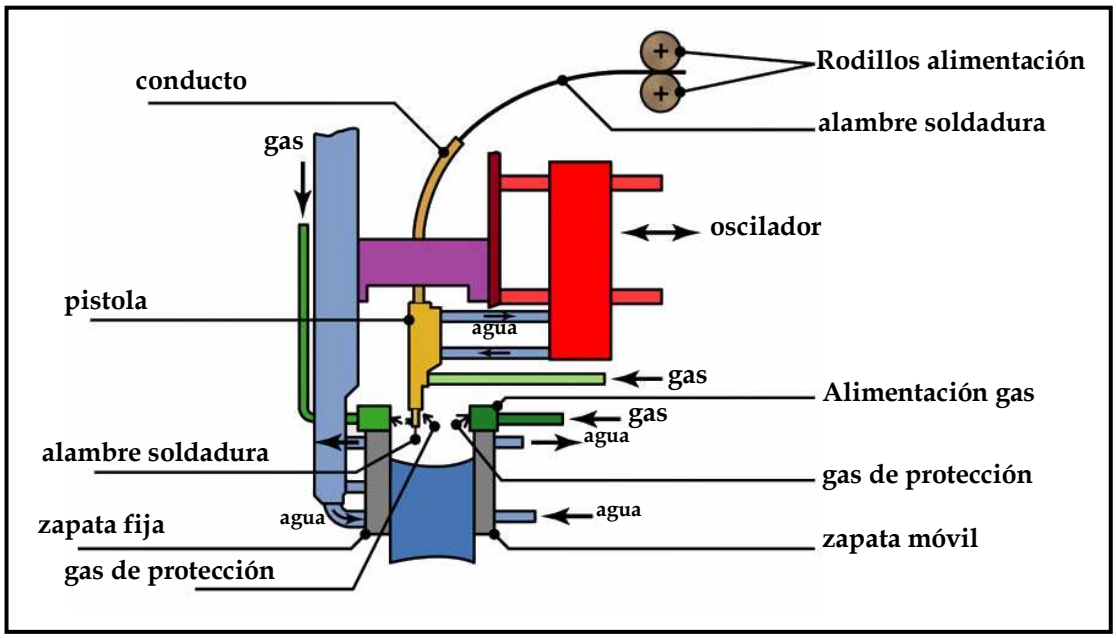



**Figura 167. Proceso de soldadura eléctrica por gas.** (Fuente [1])

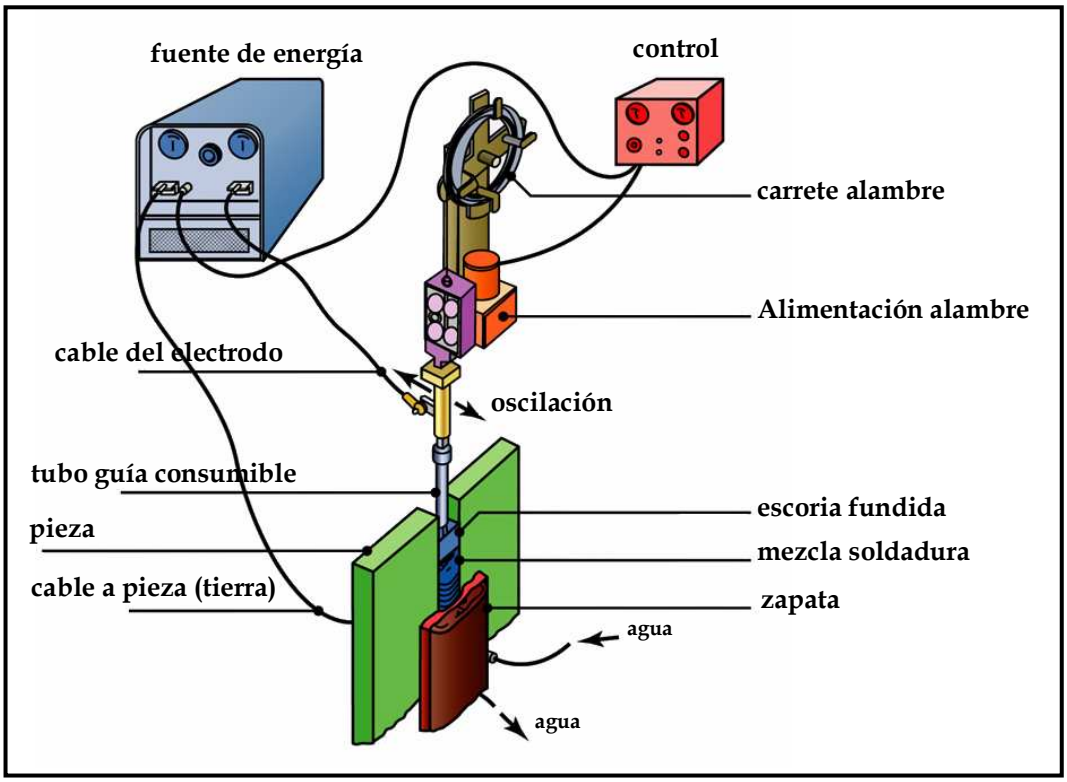



**Figura 168. Proceso de soldadura con electroescoria.** (Fuente [1])

### 7.2.4 Tipos de electrodos para soldadura por arco

Los electrodos consumibles se clasifican según:

- La resistencia del metal depositado para la soldadura.
- Tipo de corriente.
- Tipo de recubrimiento.

Se identifican con números y letras o mediante códigos de colores.

**Ejemplo:** designación de electrodos de acero dulce recubiertos.

**EXXYY o EXXXYY**

E: electrodo para soldadura por arco.

XX o XXX: resistencia mínima a la tensión.

Y: penúltimo dígito: indica la posición (1- todas; 2- posición plana y filetes horizontales)

YY: los dos últimos dígitos juntos indican tipo de recubrimiento y corriente a utilizar.

Sufijos: indican la aleación aproximada que queda en la soldadura:

| | |
|---|---|
| -A1 | 0.5% Mo |
| -B1 | 0.5% Cr, 0.5% Mo |
| -B2 | 1.25% Cr, 0.5% Mo |
| -B3 | 2.25% Cr, 1% Mo |
| -B4 | 2% Cr, 0.5% Mo |
| -B5 | 0.5% Cr, 1% Mo |
| -C1 | 2.5% Ni |
| -C2 | 3.25% Ni |
| -C3 | 1% Ni, 0.35% Mo, 0.15% Cr |
| -D1 y D2 | 0.25-0.451% Mo, 1.75% Mn |
| -G | 0.5% mín. Ni, 0.3% mín. Cr, 0.2% mín. Mo, 0.1% mín. V, 1% mín. Mn (sólo se requiere un elemento). |

**Recubrimiento:** materiales arcillosos con aglutinantes de silicato y materiales en polvo como óxidos, carbonatos, fluoruros, aleaciones metálicas y celulosa. Funciones básicas del recubrimiento:

- Estabilizar el arco.
- Generar gases de protección (dióxido de carbono, vapor de agua).
- Controla la velocidad a la que se funde el electrodo.
- Actúa como fundente para proteger la soldadura contra la formación de óxidos, nitruros y otras inclusiones.
- Agregar elementos de aleación en la zona de soldadura (mejorar las propiedades en la zona de unión).

### 7.2.5 Soldadura por haz de electrones (EBW)

Se genera calor mediante un fino haz de electrones a alta velocidad. La energía cinética de los electrones se convierte en calor al chocar con la pieza de trabajo. Requiere equipos especiales para enfocar los electrones, normalmente en vacío. Cuanto mayor sea el vacío, mayor la profundidad de soldadura que se puede lograr.

EBW-HV (alto vacío).

EBW-MV (medio vacío)

EBW-NV (sin vacío)

Apta para casi todos los metales.

### 7.2.6 Soldadura por rayo láser (LBW)

Utiliza un rayo láser de gran potencia como fuente de calor. El rayo se puede concentrar en una superficie muy pequeña, tiene gran densidad de energía y una gran capacidad de penetración. Se puede dirigir y enfocar con precisión sobre la pieza de trabajo. Es muy adecuado para uniones profundas y estrechas (relaciones profundidad/anchura entre 4 a 10).

**Ejemplo:** se usa para las soldaduras que se realizan en las hojas de afeitar Gillette (diámetro del punto de soldadura de 0.5 mm aprox.).

### 7.2.7 Zonas en la unión soldada

En una soldadura nos encontramos (Fig. 169):

- El metal base.
- Una zona afectada por el calor (microestructura diferente a la del metal base por ser sometida a temperaturas elevadas).
- El metal de la soldadura.

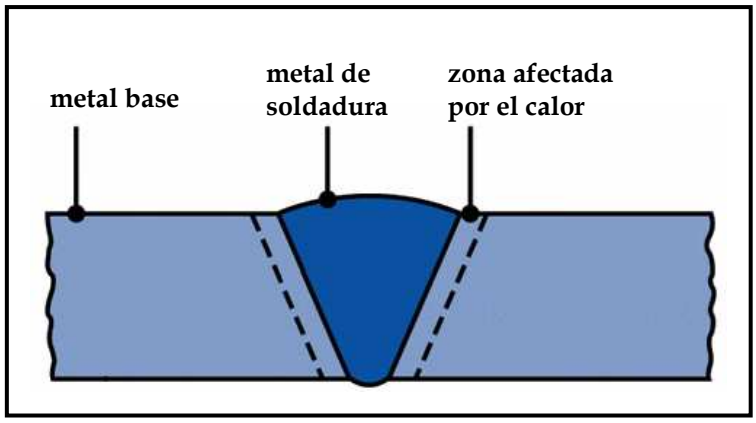



**Figura 169. Principales zonas en una soldadura.** **(Fuente [1])**

Las propiedades de la zona afectada por el calor y del metal de soldadura dependen del tipo de metales unidos, el proceso de unión, los metales de aporte y las variables del proceso de soldadura.

Si en la soldadura no se utiliza metal de aporte → **autógena** (en la zona de soldadura nos encontramos el metal base re-solidificado).

Si en la soldadura se utiliza metal de aporte → la zona central se llama **metal de soldadura**.

### 7.2.8 Diseños de la unión soldada

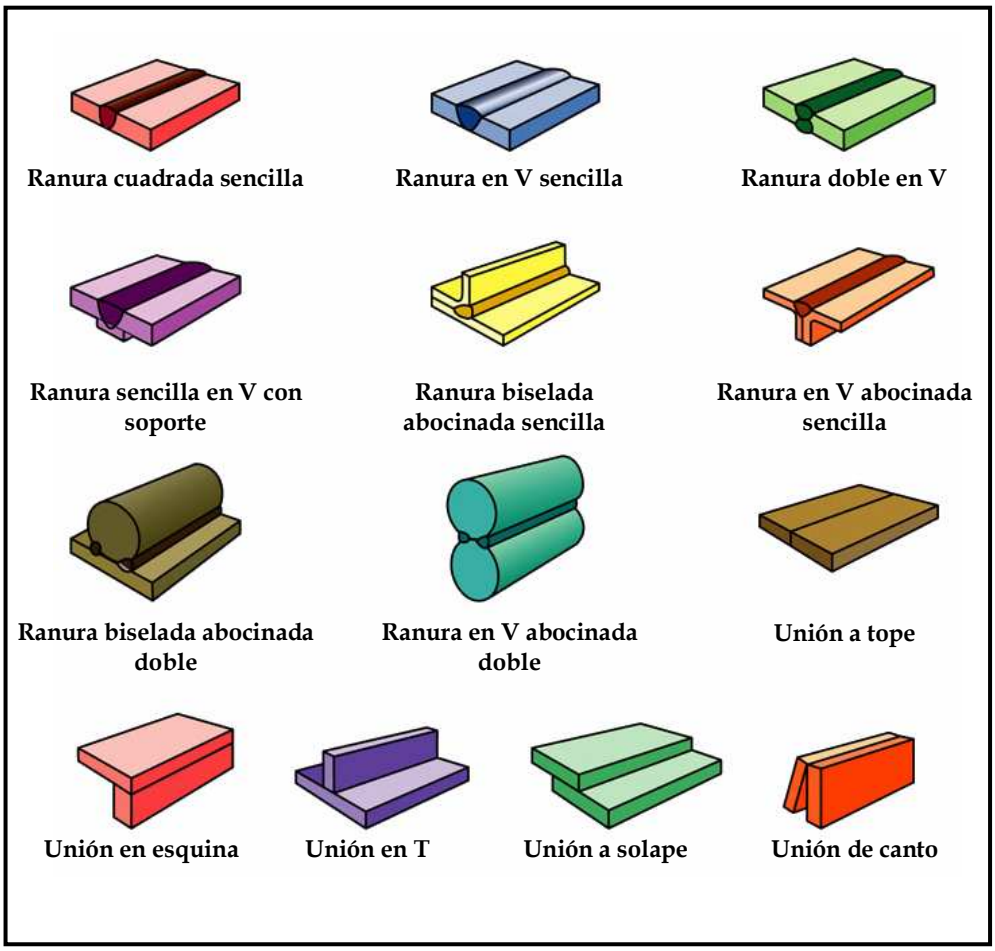



**Figura 170. Uniones soldadas - terminología.** (Fuente [1])

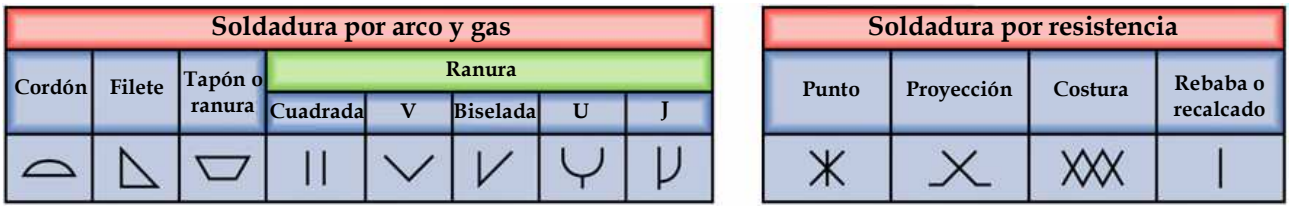



**Figura 171. Símbolos y normalización para soldadura.** (Fuente [1])

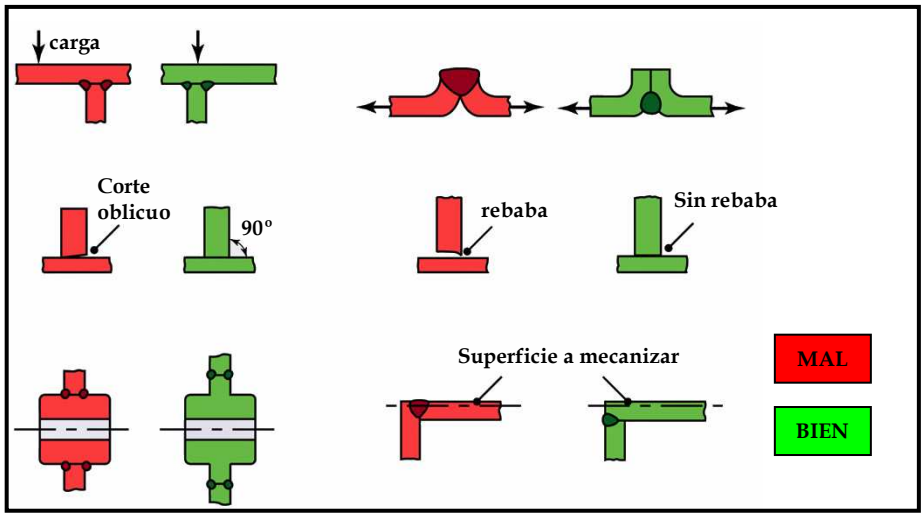



**Figura 172. Ejemplos de diseños de soldaduras.** (Fuente [1])

## 7.3 Soldadura en Estado Sólido

La unión se realiza sin fusión de las partes a soldar. Si dos superficies limpias se ponen en contacto atómico con la suficiente presión, se producen enlaces y uniones entre ellas. Es fundamental que las partes a unir no presenten óxidos, residuos, fluidos, o cualquier tipo de contaminante.

La unión en estado sólido comprende al menos uno de los siguientes fenómenos:

- **Difusión:** transferencia de átomos a través de la interfaz (superficie de contacto). La aplicación de calor (por fricción, resistencia eléctrica, inducción) mejora la resistencia de la unión.
- **Presión:** a mayor presión más fuerte será la unión.
- **Movimiento relativo:** cuando se produce movimiento relativo entre las superficies a unir, favorece la rotura de películas de óxido, generando superficies nuevas y limpias; mejorando la resistencia de la unión.

### 7.3.1 Soldadura en frío CW (laminación)

Se aplica presión a las piezas. Requiere deformación plástica, por lo que al menos una de las piezas a unir deberá ser dúctil, preferentemente las dos. Las superficies de las piezas deben limpiarse, desengrasarse, eliminar óxidos…

En la unión o soldadura por laminación (ROW) se utilizan dos rodillos de laminación (Fig. 173). Se puede realizar en caliente.

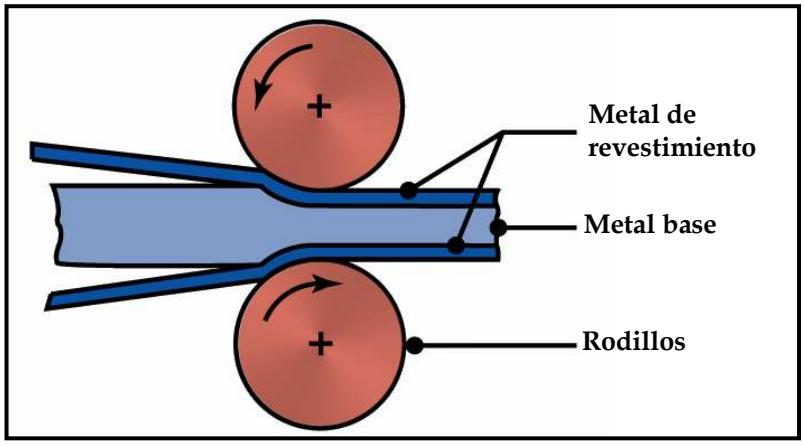



**Figura 173. Proceso de unión-soldadura por laminación. (Fuente [1])**

### 7.3.2 Soldadura ultrasónica (USW)

Las superficies a unir se someten a una fuerza normal estática y a esfuerzos tangenciales oscilantes (mediante la punta de un transductor similar al mecanizado por ultrasonidos) (Fig. 174). Frecuencia de oscilación entre 10 a 75 kHz.

Los esfuerzos cortantes producen deformación plástica, rompe las posibles películas de óxido existentes y elimina otros contaminantes, permite un buen contacto y fuerte unión entre las piezas.

Suele alcanzarse temperaturas de un tercio de la temperatura de fusión. Se puede aplicar a una alta gama de materiales metálicos y no metálicos (plásticos). La punta de soldado se puede cambiar por discos rotatorios (soldar costuras).

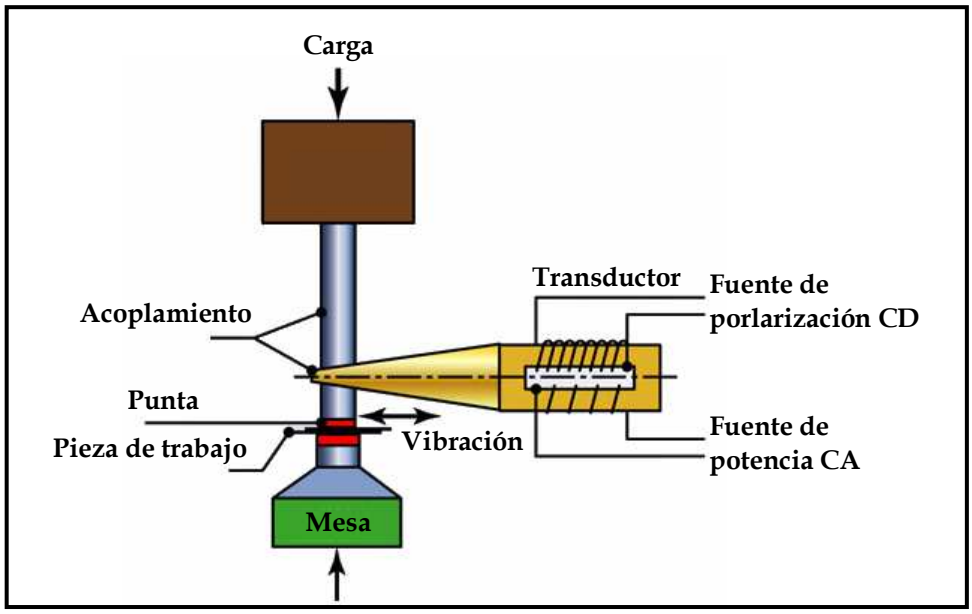



**Figura 174. Proceso de soldadura ultrasónica.** (Fuente [1])

### 7.3.3 Soldadura por fricción (FRW)

El calor necesario para la unión se produce mediante la fricción entre las superficies a unir. Una de las piezas a unir se mantiene fija, mientras que la otra se hace girar a alta velocidad constante. Las dos piezas se ponen en contacto mediante una fuerza axial; una vez conseguido suficiente contacto se detiene el giro de la pieza (para que la soldadura no se rompa por cizallamiento) y se aumenta la fuerza axial (Fig. 175).

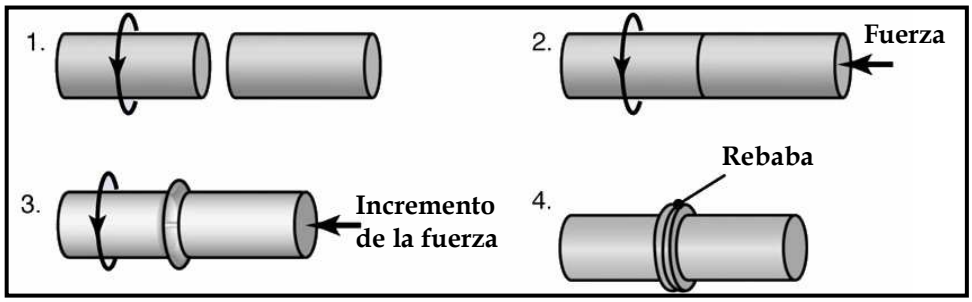



**Figura 175. Secuencia en soldadura por fricción.** (Fuente [1])

El tamaño de la zona de la soldadura depende de:

- Cantidad de calor generado.
- Conductividad térmica de los materiales.
- Propiedades mecánicas de los materiales a altas temperaturas.

La forma de la zona de la soldadura dependerá de la velocidad de rotación y de la presión aplicada.

Este tipo de soldadura se puede utilizar con una gran variedad de materiales, siempre que alguno de los componentes tenga alguna simetría rotacional.

Algunas variantes de este tipo de soldaduras son:

- **Soldadura por fricción e inercia:** es una variante de la anterior. La energía requerida para la soldadura se obtiene de la energía cinética de un volante. Este volante se acelera hasta la velocidad adecuada, en ese momento se ponen en contacto las piezas a unir (fuerza axial). A medida que la fricción entre las superficies de las piezas reduce la velocidad del volante se aumenta la fuerza axial. La soldadura se completa cuando se detiene el volante. Es fundamental la correcta sincronización de los diferentes componentes del proceso.
- **Soldadura por fricción lineal:** las superficies a unir se someten a un movimiento lineal alternativo. No es necesario que las piezas a unir tengan simetría rotacional.
- **Soldadura por fricción y agitación:** en este caso se agita una tercera pieza (o cuerpo) contra las dos superficies a unir. Una sonda rotatoria (no consumible), de unos 5-6 mm de diámetro y 5 mm de altura, se introduce en la zona de unión. Las presiones de contacto provocan el calentamiento por fricción. La sonda rotatoria produce el calentamiento y mezcla del material de las dos piezas a unir (Fig. 176). Se han conseguido soldar materiales como aluminio, cobre, acero y titanio. En la actualidad se utiliza para vehículos aeroespaciales, automovilísticos, militares y embarcaciones. El equipo necesario puede ser una fresadora vertical convencional con el husillo modificado. Se pueden soldar espesores de 1 a 50 mm.

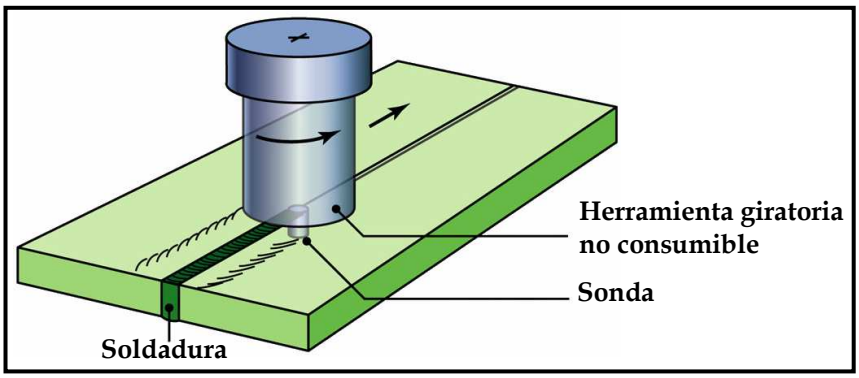



**Figura 176. Proceso de soldadura por fricción y agitación.** **(Fuente [1])**

### 7.3.4 Soldadura por resistencia (RW)

El calor necesario para la soldadura se produce mediante resistencia eléctrica a través de los componentes a unir. La principal ventaja de estos métodos es que no requiere de electrodos consumibles, gases consumibles o fundentes.

El calor generado viene dado por:

$$H = I^2 \cdot R \cdot t$$

donde,

$H$: calor generado en Julios.

$I$: intensidad de la corriente en Amperios.

$R$: resistencia en Ohmios.

$t$: tiempo de flujo de la corriente en segundos.

En dicha expresión se puede incluir un factor $K$ que representa las pérdidas de energía por conducción y radiación.

La resistencia *R* total será la suma de: la resistencia de los electrodos, la resistencia del contacto entre el electrodo y la superficie de la pieza a unir, las resistencias individuales de las partes a soldar y la resistencia del contacto entre las piezas a unir (Fig. 177).

La temperatura alcanzada dependerá también del calor específico y de la conductividad térmica de los materiales a unir. Es necesario limpiar bien las superficies, la resistencia de la unión depende también de la rugosidad de las superficies y la presencia de aceite, pintura, capas de óxido…

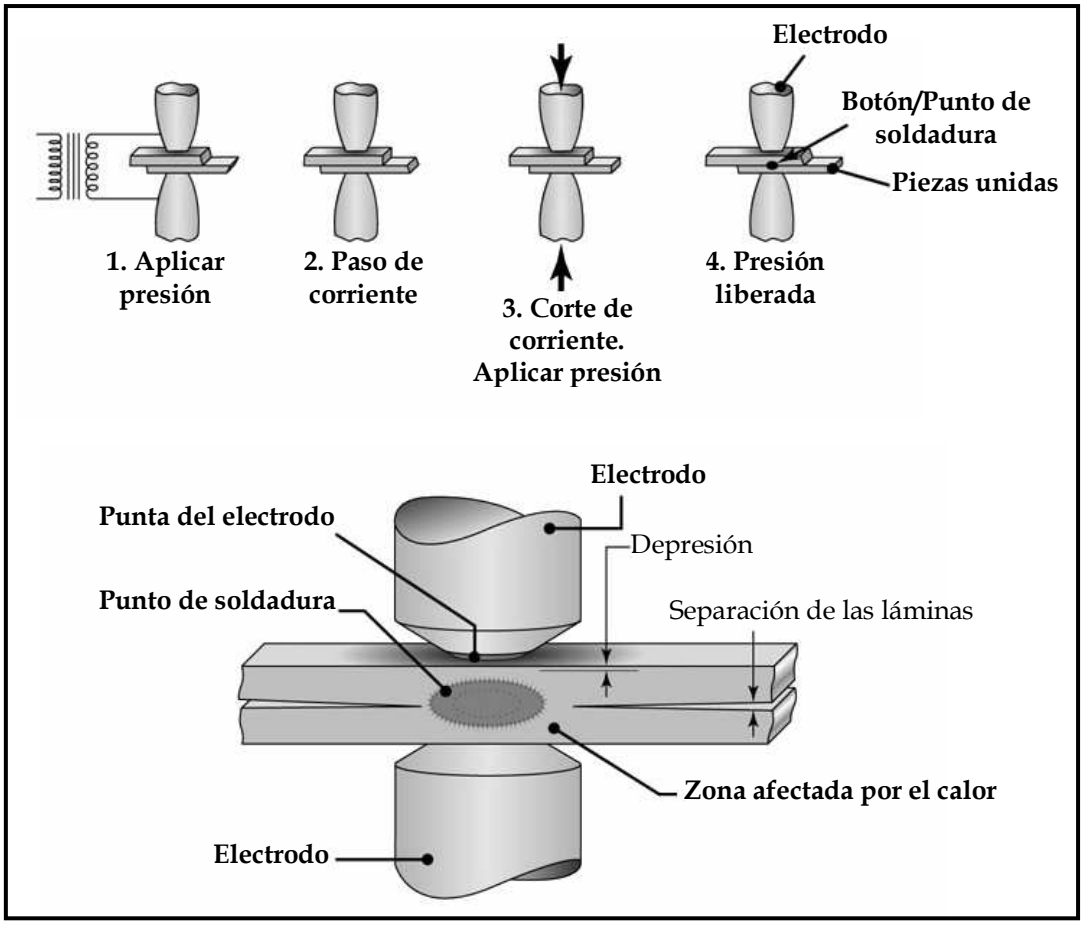



**Figura 177. Proceso de soldadura por resistencia.** **(Fuente [1])**

Este tipo de soldadura requiere de maquinaria especial. En muchos casos se requiere de control por ordenador. Existe la posibilidad de trabajar con máquinas portátiles. A diferencia de la soldadura por arco, la habilidad que se necesita del operador es mínima.

Podemos incluir dentro de este tipo de soldadura:

- Soldadura por puntos.
- Soldadura de costura por resistencia.
- Soldadura por resistencia de alta frecuencia.
- Soldadura de proyección por resistencia.
- Soldadura a tope por presión.
- Soldadura de pernos por presión y alta corriente.
- Soldadura por percusión.

**Soldadura por puntos (RSW):** las puntas de los electrodos (cilíndricos) entran en contacto con las superficies opuestas de las dos piezas a unir, el calentamiento por resistencia produce un punto de soldadura (Fig. 178). Para conseguir una unión fuerte se aplica presión hasta que se corta la corriente. Es fundamental la sincronización entre la aplicación de la corriente y de la presión.

Los puntos de soldadura suelen tener un diámetro de 6-10 mm. En la superficie del punto se produce una pequeña depresión. La corriente va de 3000 a 40000 A (depende del material y espesor); para aceros 10000 A; para aluminio 13000 A. Los electrodos suelen ser de cobre, deben tener la suficiente conductividad eléctrica y resistencia para soportar las condiciones del proceso.

Es el proceso de soldadura por resistencia más sencillo y más utilizado.

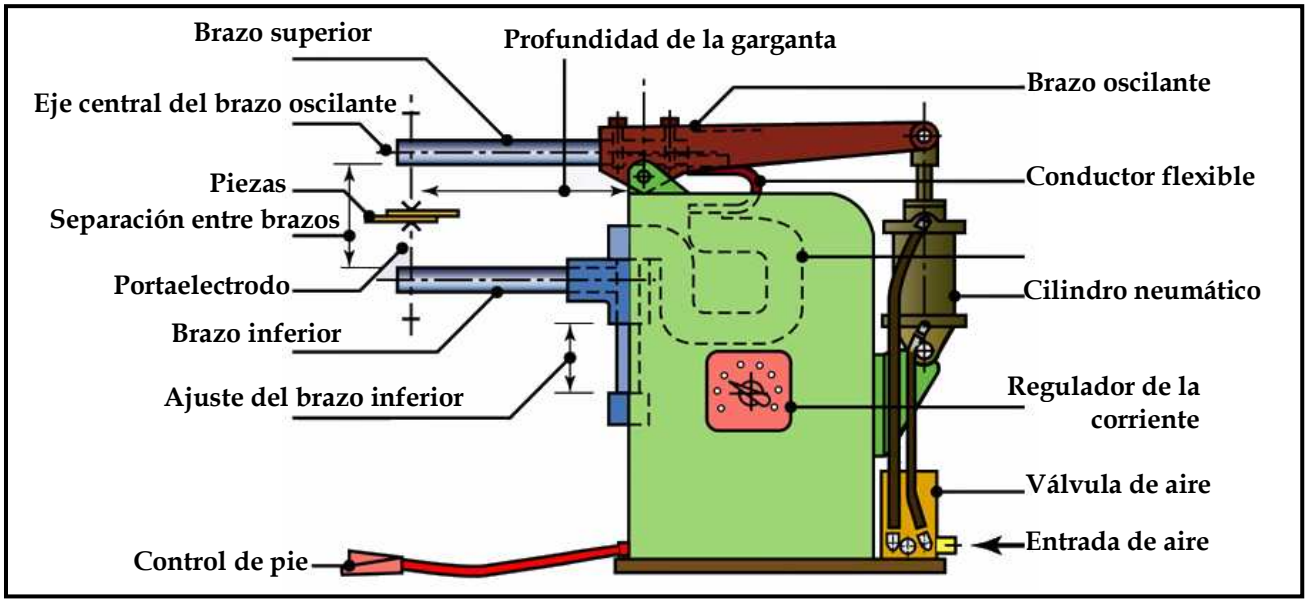



**Figura 178. Máquina neumática de soldadura por puntos.** (Fuente [1])

**Soldadura de costura por resistencia (RSEW):** es una modificación de la soldadura por puntos, en la que los electrodos se sustituyen por rodillos giratorios (Fig. 179). Con el uso de una fuente de potencia de corriente alterna, los rodillos producen un punto de soldadura cada vez que la corriente alcanza el nivel suficiente dentro de su ciclo. Utilizando frecuencias elevadas o velocidades de avance lentas del rodillo se consigue una costura continua (solapamiento de los puntos de soldadura).

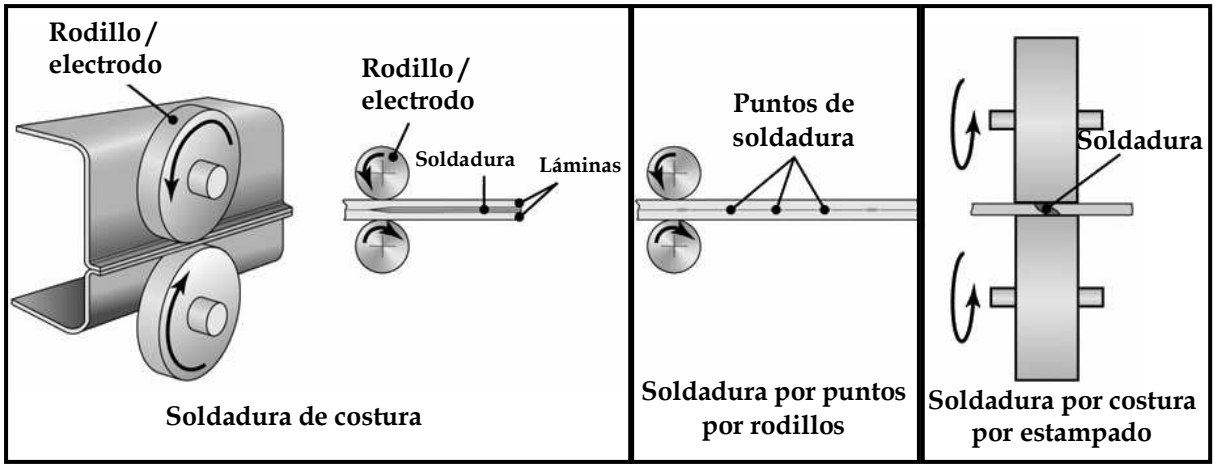



**Figura 179. Soldaduras de costura por resistencia.** (Fuente [1])

Otra opción es aplicar corriente de manera intermitente (**soldadura por puntos por rodillo**) consiguiendo una serie de puntos de soldadura con separación constante (Fig. 179).

En la **soldadura por costura por estampado** la longitud de solape entre las piezas a unir es de 1 o 2 veces el espesor de la lámina y el espesor de la costura del 90% del espesor de original de la lámina (Fig. 179).

**Soldadura por resistencia de alta frecuencia (HFRW):** es parecida a la soldadura por costura, pero en este caso se emplea una corriente de alta frecuencia (hasta 450 kHz). Un ejemplo es la soldadura de tubos longitudinalmente (Fig. 180). La corriente se hace pasar por dos contactos deslizantes hacia los lados de los tubos a soldar; posteriormente se aplica presión mediante unos rodillos de compresión. Otra variante es la **soldadura por inducción de alta frecuencia (HFIW)**.

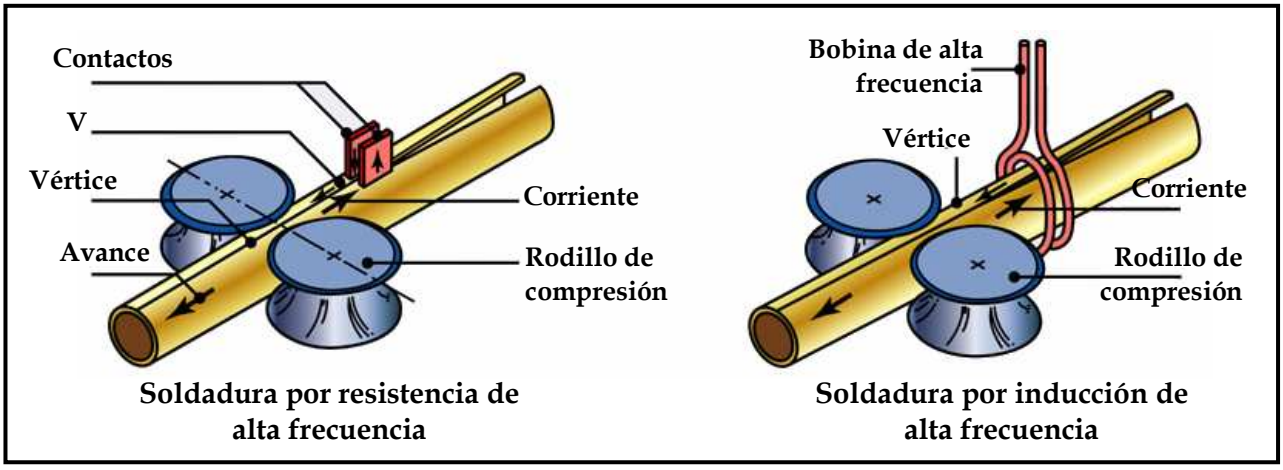



**Figura 180. Soldaduras por resistencia e inducción de alta frecuencia.** (Fuente [1])

**Soldadura por proyección por resistencia (RPW)**

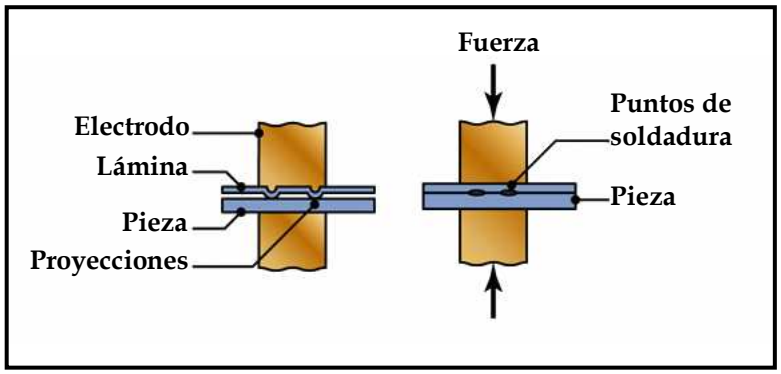



**Figura 181. Soldadura por proyección por resistencia.** (Fuente [1])

**Soldadura a tope por presión (FW):** se genera calor a partir del arco cuando las piezas entran en contacto y desarrollan resistencia eléctrica en la unión. Cuando se alcanza la temperatura suficiente se aplica presión (Fig. 182). También se le llama **soldadura por recalcado**.

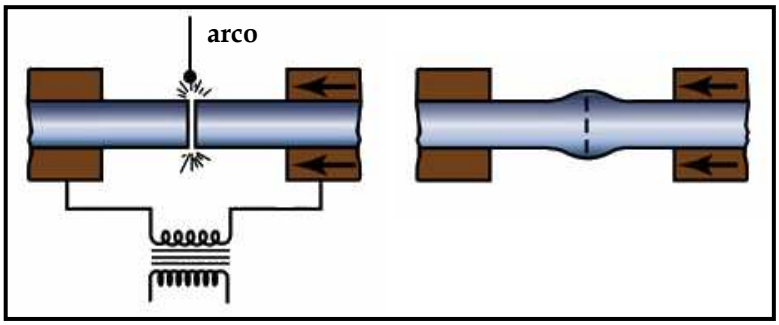



**Figura 182. Soldadura a tope por presión.** (Fuente [1])

**Soldadura de pernos por presión y alta corriente (SW):** similar a la soldadura a tope por presión. El propio perno (barra pequeña, puede ser roscada) sirve como electrodo mientras se une a otra pieza (Fig. 183).

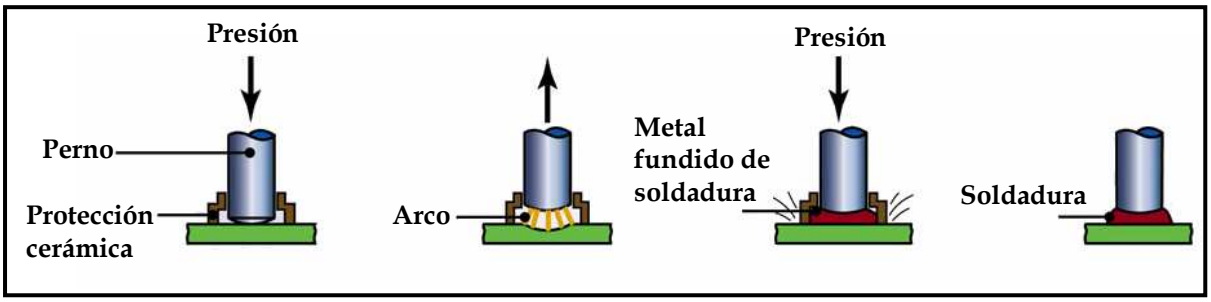



**Figura 183. Soldadura de pernos por presión y alta corriente.** (Fuente [1])

**Soldadura por percusión (PEW):** en estos casos la energía eléctrica para la soldadura se almacena en un capacitador. La potencia se descarga en 1-10 milisegundos para obtener calor localizado en la unión. Es muy útil para evitar el calentamiento de partes adyacentes a la zona de la soldadura.

### 7.3.5 Soldadura por explosión (EXW)

Se aplica presión detonando una capa de explosivo que se coloca en uno de los componentes (aleta). Se generan presiones de contacto muy elevadas, la energía cinética de la placa que golpea al otro componente genera una superficie de unión ondulada (Fig. 184). El impacto une mecánicamente las dos superficies, se produce soldadura por presión mediante deformación plástica.

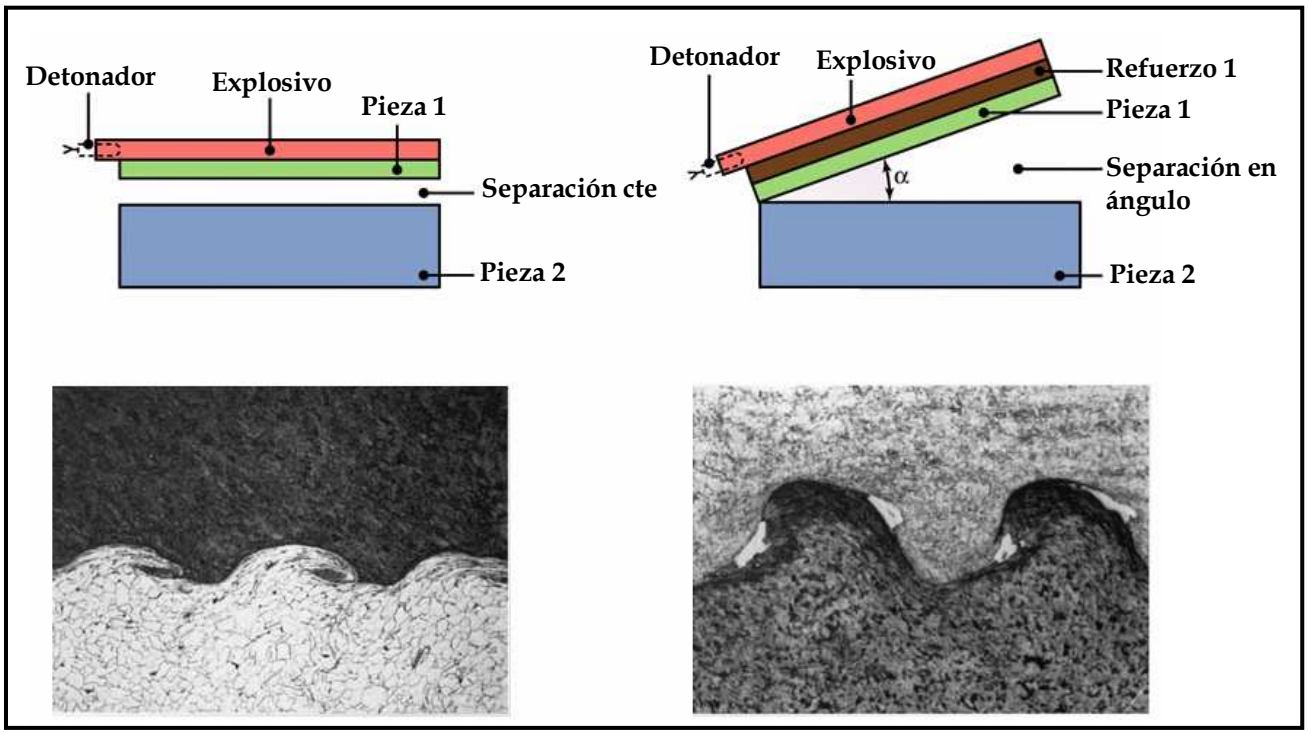



**Figura 184. Soldadura por explosión.** **(Fuente [1])**

### 7.3.6 Unión por difusión (DFW)

La resistencia a la unión se debe fundamentalmente a la difusión (movimiento de átomos entre las superficies en contacto) y a la deformación plástica de las superficies. Se requieren temperaturas en torno a 0.5 $T_m$ (temperatura de fusión del metal base).

La unión suele tener las mismas propiedades físicas y mecánicas que el metal base. Su resistencia depende de la presión, la temperatura y el tiempo de contacto; y la limpieza de las superficies de contacto.

Aunque este proceso se desarrolló en la década de 1970, este tipo de unión se utilizaba siglos atrás. Los orfebres bañaban el cobre en oro para crear "la chapa de oro". Primero obtenían una delgada lámina de oro, ésta se colocaba sobre una pieza de cobre y encima de ambas un peso. Todo ello se introducía en un horno y se dejaba hasta alcanzar una fuerte unión. A este proceso también se le llama **soldadura por presión y calor (HPW)**.

## 7.4 Soldadura Fuerte y Soldadura Blanda

Este tipo de soldaduras se utilizan cuando los materiales a unir no pueden soportar altas temperaturas, como por ejemplo los componentes electrónicos. Los procesos de soldadura fuerte y soldadura blanda requieren temperaturas inferiores a las temperaturas que se alcanzas en los procesos de soldadura vistos en apartados anteriores.

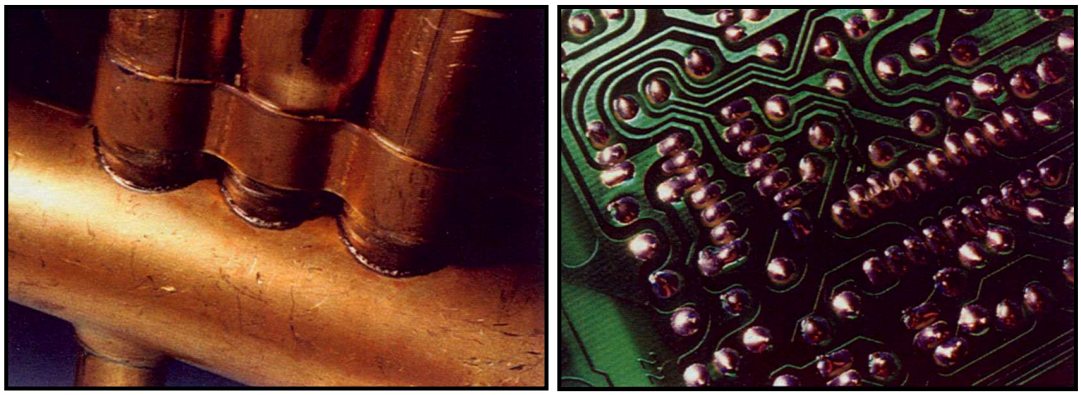


**Figura 185. Ejemplo soldadura fuerte (intercambiador de calor) y soldadura blanda (tarjeta con componentes electrónicos). (Fuente [1])**

En la soldadura fuerte y en la soldadura blanda, el metal de aporte se coloca en la zona de unión y se funde utilizando alguna fuente de calor externa. Una vez fundido el metal de aporte se distribuye por la zona de unión. Posteriormente, al solidificarse el metal de aporte se obtiene una unión resistente. La diferencia entra "fuerte" y "blanda" radica en la temperatura necesaria. En la soldadura fuerte la temperatura necesaria para fundir el metal de aporte es mayor, al igual que lo es la resistencia de la soldadura.

### 7.4.1 Soldadura Fuerte

El metal de aporte se coloca entre las superficies de las piezas a unir; se eleva la temperatura hasta fundir el metal de aporte, pero no las piezas a unir; una vez se enfría el metal de aporte se obtiene una unión fuerte y resistente (Fig. 186).

Temperatura de fusión de los metales de aporte suele ser >480ºC (inferior a la temperatura de fusión de los metales a unir).

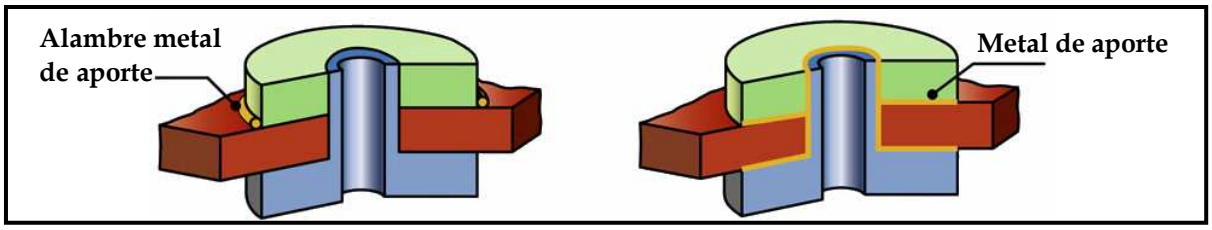



**Figura 186. Ejemplo soldadura fuerte en horno. (Fuente [1])**

Una forma de aplicar la soldadura fuerte es colocar un alambre metálico (metal de aporte) en la periferia de los componentes a unir. Se aplica calor, se funde el metal fuerte y se rellena el espacio entre las superficies (por acción capilar).

**Soldadura fuerte con oxigeno y gas combustible:** metal de aporte suele ser el latón. Como fuente de calor se utiliza una llama oxígeno-combustible, pero sin llegar a fundir el metal base de los componentes a unir.

**Metales de aporte:** existen diferentes tipos de metales de aporte, en la Tabla 10 se muestran algunos metales de aporte para soldadura fuerte, junto con el tipo de metal base con el que se asocia y su temperatura de fusión. Los metales de aporte se pueden encontrar como alambres, varillas, anillos, cuñas…

**Tabla 10. Metales de aporte comunes para soldadura fuerte**.

| Metal base (componentes a unir) | Metal de aporte | Temperatura para la soldadura fuerte (ºC) |
|---|---|---|
| Aluminio y sus aleaciones | Aluminio-silicio | 570-620 |
| Aleaciones de magnesio | Magnesio-aluminio | 580-625 |
| Cobre y sus aleaciones | Cobre-fósforo | 700-925 |
| Ferrosos y no ferrosos (excepto aluminio y magnesio) | Aleaciones de plata y cobre, cobre-fósforo | 620-1150 |
| Aleaciones de bases hierro, níquel y cobalto | Oro | 900-1100 |
| Aceros inoxidables, aleaciones de bases níquel y cobalto | Níquel-plata | 925-1200 |

**Fundentes:** son fundamentales para evitar la oxidación y retirar películas de óxido de las superficies de las piezas de trabajo (ácido bórico, boratos, fluoruros…).

**Agentes humectantes:** mejoran las características de humectación del metal de aporte fundido y la acción capilar.

Es fundamental que las superficies de las piezas estén limpias (sin óxidos ni contaminantes); esto mejora la propagación del metal de aporte fundido y aumenta la resistencia de la unión.

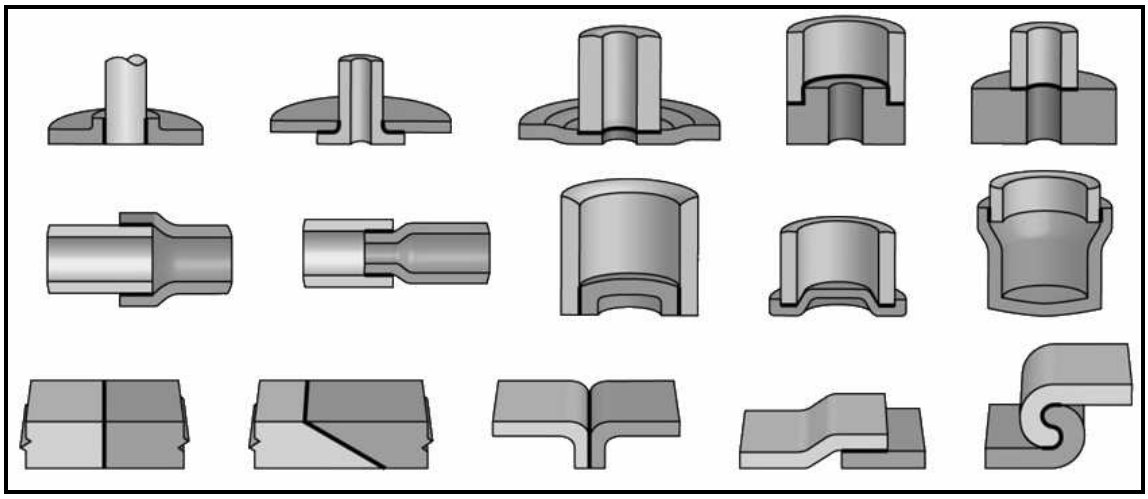


**Figura 187. Ejemplos de diseños de soldaduras fuertes. (Fuente [1])**

**Métodos de soldadura fuerte:** se diferencian por el método utilizado para el calentamiento de las piezas de trabajo:

- **Soldadura Fuerte con Soplete (TB):** se utiliza soplete de oxígeno y acetileno. Es difícil de controlar, requiere de mano de obra especializada. Para espesores de 0.25 a 6 mm.

- **Soldadura Fuerte en Horno (FB):** se limpian las partes, se coloca el metal de aporte, se ensambla y se introduce en un horno (calentamiento uniforme). Apta para formas complejas.

- **Soldadura Fuerte por Inducción (IB):** el calentamiento de las piezas se produce por inducción con corriente alterna de alta frecuencia. Las piezas se limpian, se coloca el metal de aporte y se colocan junto a unas bobinas de inducción que producen un calentamiento rápido. Para espesores inferiores a 3 mm. Adecuada para soldar partes de forma continua.

- **Soldadura Fuerte por Resistencia (RB):** la fuente de calor es la resistencia eléctrica de los componentes que se van a soldar. Se utilizan electrodos, al igual que en la soldadura por resistencia. Para espesores de 0.1 a 12 mm.

- **Soldadura Fuerte por Inmersión (DB):** los componentes a soldar se introducen en un baño del metal de aporte fundido, o en un baño de sales fundidas. Las superficies de los componentes se recubren con el metal de aporte. Se utiliza para piezas pequeñas, espesores o diámetros inferiores a 5 mm.

- **Soldadura Fuerte Infrarroja (IR):** la fuente de calor es una lámpara de cuarzo de alta intensidad. Adecuado para componentes muy pequeños, con espesores inferiores a 1 mm.

- **Soldadura Fuerte por Difusión (DFB):** se realiza en horno, con un control adecuado de temperatura y tiempo, se consigue que el material de aporte se difunda por las superficies de la unión de los componentes. Espesores de hasta 50 mm.

- **Haces de alta Energía:** aplicaciones especiales y de gran precisión. Para metales y aleaciones a alta temperatura. Se utilizan haces de electrones o rayos láser para el calentamiento.

- **Soldadura Fuerte por Oxígeno y Gas Combustible:** similar a la soldadura por fusión. El uso de fundente es fundamental. Similar a TB pero con diferentes gases combustibles.

### 7.4.2 Soldadura Blanda

El metal de aporte se funde a una temperatura relativamente baja. Al igual que la soldadura fuerte, el metal de aporte rellena las cavidades de la unión por la acción capilar entre los componentes a unir y el metal de aporte fundido.

Las aleaciones que se utilizan para soldadura blanda deben tener baja tensión superficial y alta capacidad de humectación.

Las fuentes de calor suelen ser cautines, sopletes u hornos. La aplicación de aleaciones de cobre-oro y estaño-plomo se remonta a los años 4000-3000 a.c.

La soldadura se utiliza principalmente en la industria electrónica. Debido a la baja temperatura de la soldadura blanda, no son válidas para aplicaciones posteriores a altas temperatura. Su resistencia es baja, por lo que no se pueden utilizar para unir piezas que se verán sometidas a cargas.

**Aleaciones (metal de aporte):** según la aplicación puede variar la proporción entre los componentes de las aleaciones del metal de aporte. El uso del plomo, dada su toxicidad para el medio ambiente, se ha ido sustituyendo por otras aleaciones.

**Fundentes:** su objetivo es el mismo que para el resto de soldaduras:

- Ácidos o sales inorgánicas: soluciones cloruro de zinc y amonio para limpiar las superficies. Una vez efectuada la soldadura hay que limpiar la superficie con agua para evitar la corrosión por el fundente.
- De base resina: no corrosivos, para aplicaciones eléctricas.

**Tabla 11. Aleaciones (Metales de aporte) para soldadura blanda.**

| Aleación (metal aporte) | Aplicación |
|---|---|
| Estaño-plomo | Propósito general |
| Estaño-zinc | Aluminio |
| Plomo-plata | Resistencia a temperaturas superiores a la ambiente |
| Cadmio-plata | Resistencia a altas temperaturas |
| Zinc-aluminio | Aluminio, resistencia a la corrosión |
| Estaño-plata | Electrónica |

**Métodos de soldadura blanda:**

- **Soldadura Blanda con Soplete (TS).**
- **Soldadura Blanda en Horno (FS).**
- **Soldadura Blanda con Cautín (INS).**
- **Soldadura Blanda por Inducción (IS).**
- **Soldadura Blanda por Resistencia (RS).**
- **Soldadura Blanda por inmersión (DS).**
- **Soldadura Blanda infrarroja (IRS).**
- **Soldadura Blanda Ultrasónica.**
- **Soldadura con Pasta o de Reflujo (RS).**
- **Soldadura con Olas (WS).**

**Soldadura con Pasta (RS):** la pasta de soldadura está compuesta de partículas metálicas de aleaciones, fundente, algún aglutinante y humectantes (son viscosas, semisólidas). La pasta se coloca en las piezas a unir (directamente o mediante tamizado), se ensamblan y se calientan en horno (Fig. 188):

- Se evaporan los solventes que hay en la pasta.
- Se activa el fundente y se produce el fundido.
- Se precalientan los componentes a unir.
- Se funden las partículas de la soldadura blanda y humedecen la unión.
- Se enfría a baja velocidad.

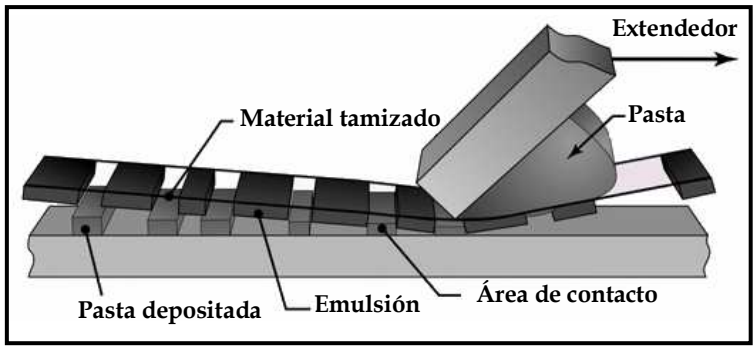



**Figura 188. Tamizado de pasta de soldadura blanda en una tarjeta de circuitos.** **(Fuente [1])**

**Soldadura por Olas (WS):** muy utilizada para la sujeción de componentes de circuitos a las tarjetas electrónicas. Una bomba genera una ola laminar alzada de la aleación fundida. La tarjeta electrónica precalentada y con el fundente se hace pasar sobre la ola. La aleación humedece las superficies metálicas expuestas en la tarjeta, pero no se adhiere al polímero del empaque de los circuitos integrados, ni se pega a la tarjeta (Fig. 189). Un chorro de aire caliente (*cuchilla de aire*) elimina el exceso de soldadura blanda.

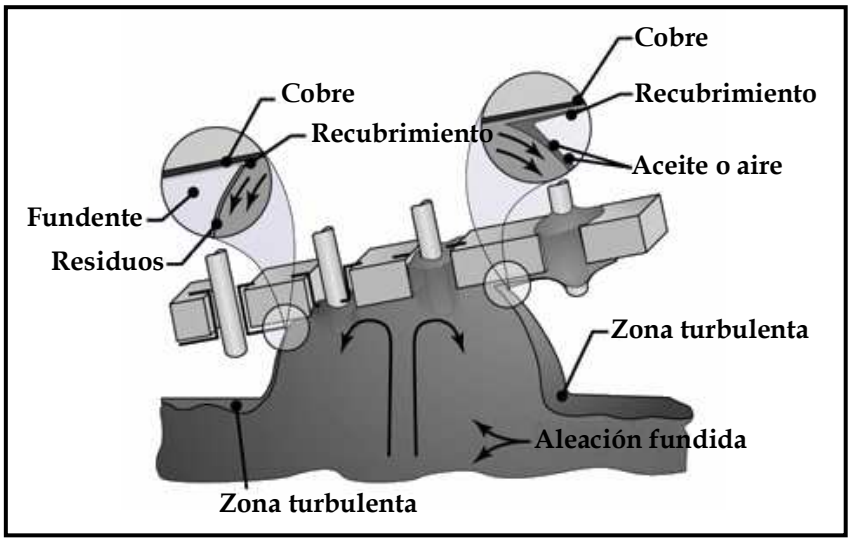



**Figura 189. Soldadura por olas.** **(Fuente [1])**

# 8 TEMA 8: OTROS MÉTODOS DE FABRICACIÓN

## 8.1 Introducción

Los procesos de mecanizado que hemos visto anteriormente (principalmente torno y fresadora) se basan en la eliminación del material mediante medios mecánicos. En determinadas situaciones estos métodos no son válidos para el mecanizado:

- Resistencia y dureza muy elevadas (por encima de 400 HB).
- Material de la pieza de trabajo muy frágil.
- Pieza de trabajo muy flexible, o muy esbelta, o resulta difícil sujetar las partes.
- Formas muy complejas.
- Requerimientos especiales de acabado superficial y tolerancias dimensionales.
- No se puedan permitir temperaturas elevadas durante el mecanizado; no sean deseables esfuerzos residuales en la pieza de trabajo.

Estos requerimientos han dado lugar a una serie de métodos de mecanizado *"no convencionales o no tradicionales"*:

- Mecanizado químico.
- Mecanizado electroquímico.
- Rectificación eletroquímica.
- Mecanizado por descarga eléctrica (electroerosión).
- Mecanizado ultrasónico.
- Mecanizado por rayo láser.
- Mecanizado por haz de electrones.
- Mecanizado por chorro de agua.
- Mecanizado por chorro abrasivo.

**Tabla 12. Características generales de los procesos de mecanizado avanzado. (Fuente [1])**

| Proceso | Características | Parámetros de proceso y velocidad característica de eliminación de material o velocidad de corte. |
|---|---|---|
| **Mecanizado Químico** | Poca profundidad en superficies planas y curvas; troquelado de láminas delgadas; bajo coste de herramientas y equipos; adecuado para pequeños lotes. | 0.0025 – 0.1 mm $min^{-1}$ |
| **Mecanizado Electroquímico** | Formas complejas con cavidades profundas; velocidad superior a procesos convencionales; alto coste de herramientas y material; elevado consumo eléctrico; para lotes medio-grandes | Voltaje: 5-25 V CD<br>Intensidad: 1.5-8 A $mm^{-2}$<br>Velocidad: 2.5-12 mm $min^{-1}$ |
| **Rectificación Electroquímica** | Corte y afilado de materiales duros, como herramientas de carburo de tungsteno. | Intensidad: 1-3 A $mm^{-2}$<br>Velocidad: 25 $mm^3$ $s^{-1}$ por 1000 A |
| **Mecanizado por descarga eléctrica** | Formado y corte de piezas complejas con materiales duros; puede producir desperfectos superficiales; se usa también como rectificado y corte; alto coste de herramientas y equipos. | Voltaje: 50-380 V CD<br>Intensidad: 0.1-500 A<br>Velocidad:300 $mm^3$ $min^{-1}$ |
| **Mecanizado por descarga eléctrica por alambre** | Corte de contornos de superficies planas o curvas; alto coste equipo | Según material y espesor |
| **Mecanizado por rayo láser** | Corte y producción de orificios en piezas delgadas; zonas afectadas por el calor; no requiere vacío; alto coste equipos; consume mucha energía. | 0.5-7.5 m $min^{-1}$ |
| **Mecanizado por haz de electrones** | Corte y producción de orificios en piezas delgadas; orificios y ranuras muy pequeñas; zonas afectadas por calor; requiere vacío; alto coste equipos. | 1-2 $mm^3$ $min^{-1}$ |
| **Mecanizado por chorro de agua** | Corte de todo tipo de materiales no metálicos; corte de materiales flexibles; sin daño térmico; ruidoso. | Según material |
| **Mecanizado por chorro de agua + abrasivo** | Corte de una o varias capas de materiales metálicos y no metálicos. | Hasta 7.5 m $min^{-1}$ |
| **Mecanizado por chorro de abrasivo** | Corte, ranurado, rebabeo, ataque y limpieza de materiales metálicos y no metálicos; tiende a redondear aristas afiladas; puede ser peligroso. | Según material |

## 8.2 Mecanizado Químico

El mecanizado químico (CM) se basa en el ataque de algunos productos químicos sobre metales, piedras y algunos materiales cerámicos, permitiendo la retirada de pequeñas cantidades de material. En algunos casos se trata de eliminar poco material sobre piezas caras y frágiles (ejemplo: tarjetas utilizadas en la industria electrónica).

Se basa en una disolución química y el uso de **reactivos** como soluciones ácidas y alcalinas. Se utiliza por ejemplo en el grabado de piedras y metales. Se basa en la reacción que tienen ciertos reactivos sobre algunos elementos. Por ejemplo, los ácidos atacan a los metales y las cetonas descomponen ciertos tipos de plásticos. Controlando estas reacciones se pueden utilizar como métodos de mecanizado. Una ventaja es que permite controlar con gran exactitud la cantidad de material eliminado (el proceso se analiza átomo a átomo). Además, no requieren equipos específicos muy costosos.

Este método se restringe fundamentalmente a trabajos muy delicados que no puedan hacerse con otros métodos. Dificultades:

- Es difícil conseguir aristas vivas.
- Es relativamente lento (se basa en la corrosión).
- Utiliza ácidos y otros reactivos (salud de las personas, contaminación).
- Requiere de alta formación de los operarios.

**Fresado químico:** se utiliza para realizar cavidades poco profundas en placas, láminas, forjas y extrusiones (para reducir el peso). Se puede utilizar en una amplia gama de materiales y permite el mecanizado de profundidades de hasta 12 mm. Se utiliza en la industria aeroespacial para retirar capas de material (poco profundas) de componentes de naves aéreas, cubiertas de misiles; también se emplea en la fabricación de dispositivos microelectrónicas.

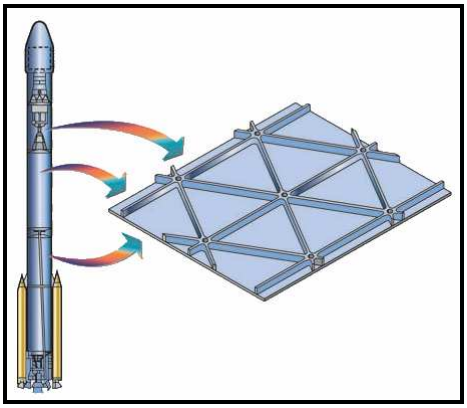


**Figura 190. Fresado químico en placas de aleación de aluminio para reducir el peso en vehículos para lanzamiento espacial. (Fuente [1])**

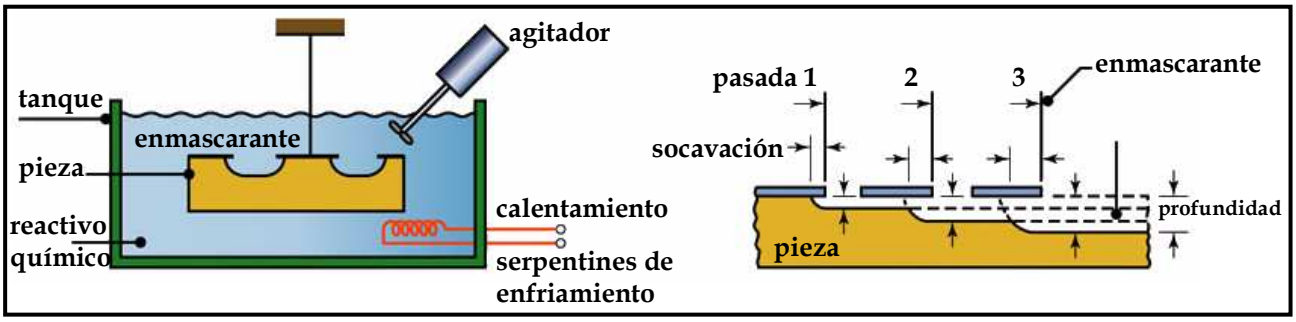



**Figura 191. Esquema del proceso de mecanizado químico. (Fuente [1])**

El mecanizado selectivo sobre la superficie del material se realiza utilizando capas de **enmascaramiento** y/o sumergiendo parcialmente la pieza de trabajo en el reactivo. Pasos a seguir en el fresado químico:

1. Eliminar esfuerzos residuales si los hubiera en la pieza de trabajo.
2. Limpiar y desengrasar muy bien las superficies de trabajo. Eliminar cascarilla u otros depósitos.
3. Aplicar el enmascarante (cintas o pinturas), también se puede usar elastómeros (hule, neopreno) y plásticos (cloruro de polivinilo, polietileno).
4. Revisar partes del enmascarante que deban ser eliminadas (por ejemplo, para hacer rayado).
5. Mecanizar las superficies expuestas mediante reactivos atacantes (hidróxido sódico para aluminio; soluciones de ácidos clorhídrico y nítrico para aceros; cloruro férrico para acero inoxidable). Controlar temperatura y agitación para obtener profundidad uniforme.
6. Finalizado el mecanizado, lavar muy bien las piezas.
7. Eliminar enmascarante (suele disolverse con algún solvente).
8. Realizar operaciones de acabado (si fuera necesario).

**Troquelado químico:** se utiliza para producir trabajos en los que se traspase el espesor del material. Se utiliza por ejemplo para el troquelado de tarjetas para circuitos impresos sin dejar rebabas.

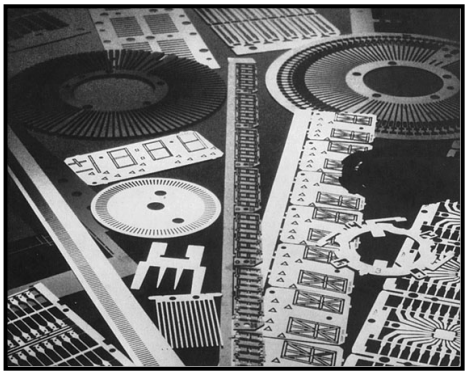


**Figura 192. Ejemplos de piezas obtenidas mediante troquelado químico. (Fuente [1])**

**Troquelado fotoquímico:** similar al fresado químico, el material se elimina mediante técnicas fotográficas. Se utiliza para láminas muy delgadas (de hasta 0.0025 mm). La industria de la electrónica es uno de los mayores campos de aplicación, circuitos impresos, microchips de silicio. También se aplica en pantallas delgadas, pantallas de televisores a color…. Pasos a seguir:

1. Preparar el diseño de la parte a troquelar (aumentado 100X para identificar desperfectos de tamaño muy reducido). Se obtiene el negativo fotográfico (boceto) y se reduce al tamaño adecuado.
2. Recubrir la lámina a mecanizar con el material fotosensible (fotorresistente) mediante baño, rociado, rodillos (emulsión)… Se seca en horno.
3. Colocar el negativo sobre la pieza y se expone a la luz ultravioleta, se endurecen las partes expuestas.
4. Se desarrolla la pieza, se disuelve las áreas expuestas.

5. La pieza se sumerge en un baño o se rocía con reactivo, lo que ataca y retira las áreas expuestas.
6. Se retira el material enmascarador y se lava totalmente la pieza.

**Algunas consideraciones para el mecanizado químico:**

- Deben evitarse esquinas agudas, cavidades profundas y estrechas, costuras plegadas… En definitiva, zonas de difícil acceso para el reactivo.
- Precauciones con las socavaciones (Fig. 191).
- Se recomienda obtener la preforma de la pieza por otro proceso (por ejemplo mecanizado) antes de obtener la forma definitiva mediante mecanizado químico. No apto para desbastes.
- La humedad y temperatura puede afectar al resultado final.

## 8.3 Mecanizado Electroquímico

El concepto de electroquímica implica transformaciones que requieren la presencia de electrodos. Se denomina célula electroquímica al sistema formado por dos electrodos sumergidos en un electrolito y unidos externamente por un conductor metálico.

Si en la célula tiene lugar una reacción química que genera una corriente eléctrica (célula o pila galvánica). Si el paso de una corriente eléctrica es la que da lugar a la reacción química (célula o cuba electrolítica).

El voltaje de una pila eléctrica depende de la facilidad con la que el metal cede electrones a la disolución. El electrodo más activo (el que cede más rápidamente electrones) es el ánodo (-); el otro será el cátodo (+). Si queremos invertir una reacción química espontánea será necesario suministrar energía (pasando una corriente eléctrica por la célula bajo una determinada diferencia de potencial). Al invertir la reacción, será el electrodo más activo el que capte los iones y el menos activo el que los libere. En este principio se basa el mecanizado electroquímico, en este caso la pieza de trabajo será el ánodo y la herramienta el cátodo.

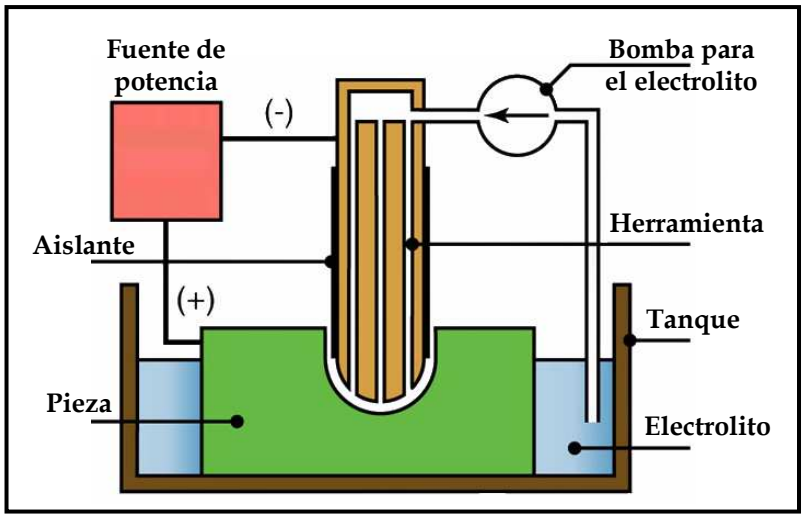



**Figura 193. Esquema del proceso de mecanizado electroquímico. (Fuente [1])**

En el mecanizado electroquímico (ECM) un **electrolito** portador de la corriente y con alta velocidad de movimiento en el espacio entre la pieza de trabajo y la herramienta (0.1-0.6 mm), arranca y arrastra iones metálicos de la pieza (ánodo) antes de que se puedan depositar en la herramienta (cátodo). La cavidad que se produce será el negativo de la herramienta (Fig. 193). Este

tipo de procesos se utiliza para piezas con formas complejas y con cavidades en materiales de alta resistencia (industria aeroespacial, automotriz y para aplicaciones médicas).

La **herramienta** suele ser de latón, cobre o acero inoxidable.

El **electrolito** es un fluido inorgánico muy conductor (ejemplo, solución acuosa de nitrato de sodio). Velocidades de bombeo de 10-16 m $s^{-1}$. La fuente de potencia de corriente directa o continua CD (entre 10-25 V) mantiene una densidad de corriente para la mayoría de aplicaciones de 20-200 A $cm^{-2}$ de la superficie activa de mecanizado (bajo voltaje y alta intensidad).

La forma de la **herramienta** es fundamental en estos procesos, ya que la forma de la pieza será el negativo de la herramienta (esto dificulta el proceso con formas complejas, difícil de optimizar).

El **electrolito**: (i) debe llenar la zona entre la herramienta y la pieza; (ii) debe permitir que tenga lugar la reacción; (iii) debe eliminar el calor y los productos generados en el mecanizado. Además: debe ser buen conductor de la electricidad, barato, no tóxico, seguro y poco corrosivo. Se suele utilizar cloruro sódico disuelto en agua o nitrato sódico que es menos corrosivo.

**Algunas consideraciones para el mecanizado electroquímico:**

- No es adecuado para esquinas agudas o fondos planos (el electrolito tiende a erosionar los perfiles agudos).
- No es adecuado para cavidades excesivamente complejas (sería difícil hacer que el electrolito fluya de forma uniforme por todas las cavidades).
- En orificios y cavidades hay que dar cierto ángulo de salida.
- En el proceso intervienen diversos factores (complejidad de funcionamiento):
    - Eléctricos: densidad de corriente, voltaje…
    - Electrolito: concentración, temperatura, presión, velocidad de flujo…
    - Herramienta: velocidad de eliminación.
    - Pieza de trabajo: sección del flujo.

## 8.4 Rectificación Electroquímica

La rectificación electroquímica (ECG) es una combinación del mecanizado electroquímico y el rectificado convencional. Se utiliza un equipo similar a una rectificadora convencional, el disco es un cátodo rotatorio con partículas abrasivas (de diamante u óxido de aluminio), gira a una velocidad superficial de 1200-2000 m $mm^{-1}$.

Las **partículas abrasivos**: (1) sirven de aislante entre el disco y la pieza de trabajo. (2) retiran mecánicamente productos electrolíticos de la zona de trabajo. La mayor parte de la eliminación del material se produce por la acción electrolítica (menos del 5% se produce por la acción abrasiva del disco). El desgaste del disco es muy bajo.

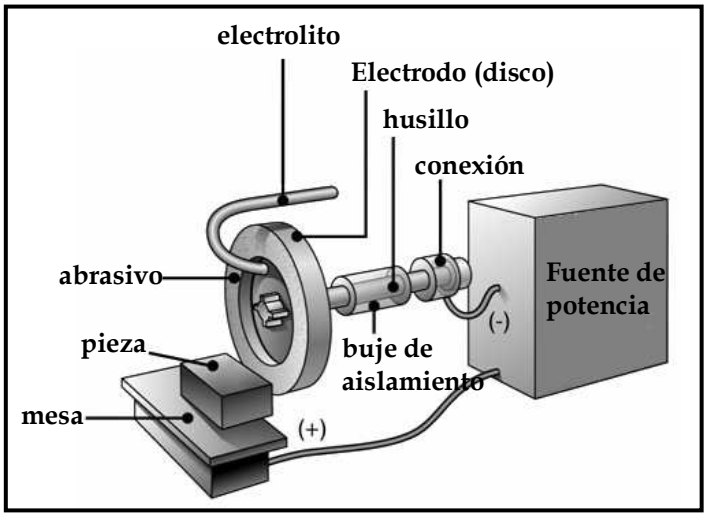



**Figura 194. Esquema del proceso de rectificado electroquímico. (Fuente [1])**

## 8.5 Mecanizado por descarga eléctrica (electroerosionado)

Fue el primero de los métodos conocidos como no convencionales que surgieron en el mercado.

El mecanizado por descarga eléctrica o electroerosionado (EDM), también llamado mecanizado por electrodescarga o por erosión, consiste en la erosión de los metales mediante descargas por chispas. Cuando dos alambres conductores de corriente se ponen en contacto se produce un arco; si observamos de cerca la zona de contacto veremos que se han erosionado los alambres, perdiendo una pequeña parte de material (dejando un pequeño cráter). Éste es un proceso de fabricación muy utilizado (obtención de matrices para extrusión y forja, fundición a presión, moldeo por inyección; orificios profundos de diámetros pequeños mediante alambre de tungsteno; ranuras estrechas…).

Un sistema básico de EDM consiste en una herramienta con forma (*electrodo de penetración*) y una pieza de trabajo conectada a una fuente de potencia de corriente directa o continua CD. La pieza se coloca en un fluido dieléctrico (no conduce la electricidad). Cuando la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza de trabajo es lo suficientemente elevada, supera al fluido dieléctrico y se descarga una chispa transitoria a través del fluido, que elimina una pequeña cantidad de material de la pieza de trabajo. Como es lógico la pieza de trabajo debe ser conductora de la corriente eléctrica.

Al aumentar el voltaje entre los electrodos aumenta el desorden interno del fluido hasta que termina siendo ionizado, pasando de ser no conductor a conductor de la electricidad, permitiendo que el flujo de corriente pase del electrodo a la pieza de trabajo en forma de descarga de chispas.

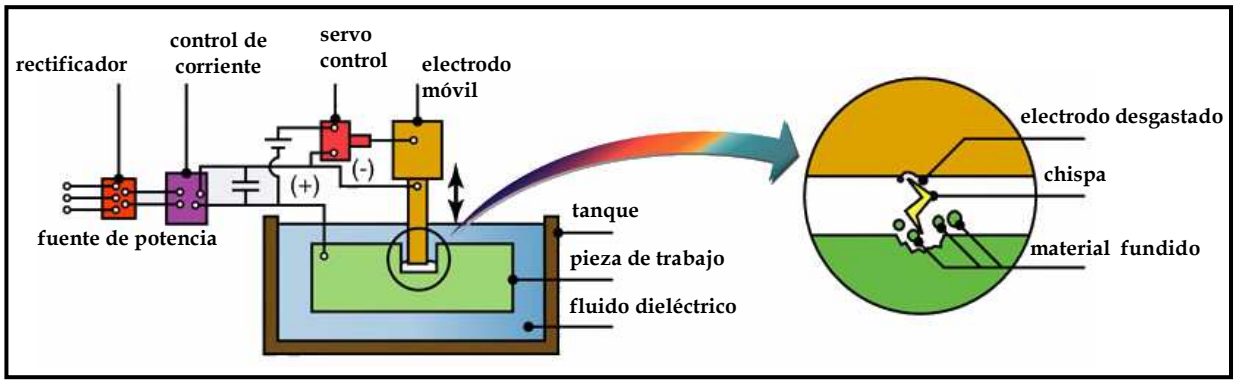



**Figura 195. Esquema del proceso de mecanizado por descarga eléctrica. (Fuente [1])**

La descarga se repite para frecuencias de 200-500 kHz, voltajes entre 50-380 V e intensidad de corriente de 0.1 a 500 A. Por cada chispa se elimina entre $10^{-6}$-$10^{-4}$ $mm^3$. La pieza queda sujeta dentro del tanque y es la herramienta quien tiene capacidad de movimiento. La temperatura en la zona de trabajo oscila entre 5000 y 10000ºC (fusión y vaporización de pequeñas cantidades de material).

**Fluidos dieléctricos:** (i) funcionan como aislante hasta que el potencial sea lo suficientemente elevado, para controlar la resistencia a la descarga eléctrica en la zona intermedia; (ii) es un medio de enfriamiento, apaga la chispa rápidamente una vez finalizada la descarga, previniendo la formación de un arco continuo; (iii) medio de limpieza para retirar los restos de material entre el electrodo y la pieza. Se pueden emplear aceites minerales, parafina, queroseno, agua destilada y desionizada.

**Electrodos:** suelen ser de grafito, también los hay de latón, cobre o aleaciones de cobre-tungsteno. Estas herramientas suelen tener alguna forma determinada, según la forma final de la pieza que deseemos. La forma de la herramienta/electrodo se obtiene mediante moldeado, fundición, metalurgia de polvos o mecanizado CNC. El electrodo debe:

- Alta conductividad eléctrica y térmica.
- Alto punto de fusión.
- Coste bajo.
- Facilidad de mecanizado.

En este caso, la chispa además de eliminar material de la pieza también desgasta al electrodo. Es fundamental controlar el desgaste de la herramienta, ya que en la mayoría de los casos se utilizan herramientas cuya forma determinan la forma final de la pieza. El desgaste de la pieza se mide como la relación entre el material eliminado de la pieza y el material eliminado de la herramienta, que puede ir de 3:1 en herramientas metálicas a 100:1 en herramientas de grafito.

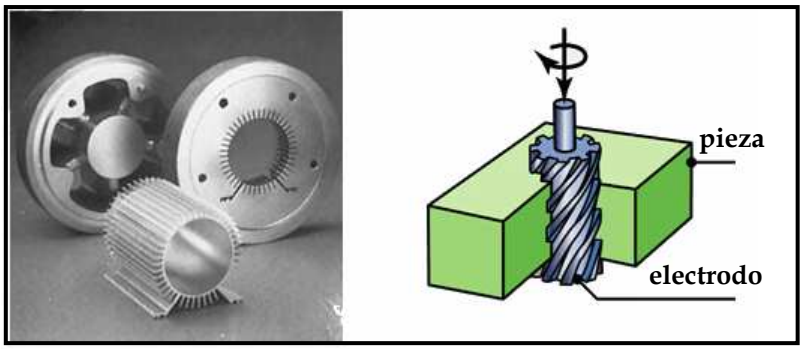



**Figura 196. Juego de matrices obtenidas mediante electroerosinado (izq.). Cavidad espiral producida con electrodo de rotación lenta (dcha.). (Fuente [1])**

**Algunas consideraciones para el mecanizado por descarga eléctrica:**

- Es independiente de la dureza del material de trabajo.
- Permite trabajar materiales frágiles y fácilmente deformables.
- La forma de los electrodos no debe ser muy compleja (economía).
- Evitar ranuras profundas y aberturas estrechas.
- El acabado superficial no es muy bueno.
- No apto para desbaste (criterios económicos).

**Mecanizado por descarga eléctrica con alambre (electroerosión por hilo):** un alambre con movimiento lento se desplaza, siguiendo una trayectoria programada, cortando la pieza de trabajo. Se utiliza para cortar placas metálicas de hasta 300 mm de espesor; para fabricar punzones, herramientas y matrices a partir de metales duros. Funcionamiento "similar" al de una sierra de cinta de hoja continua.

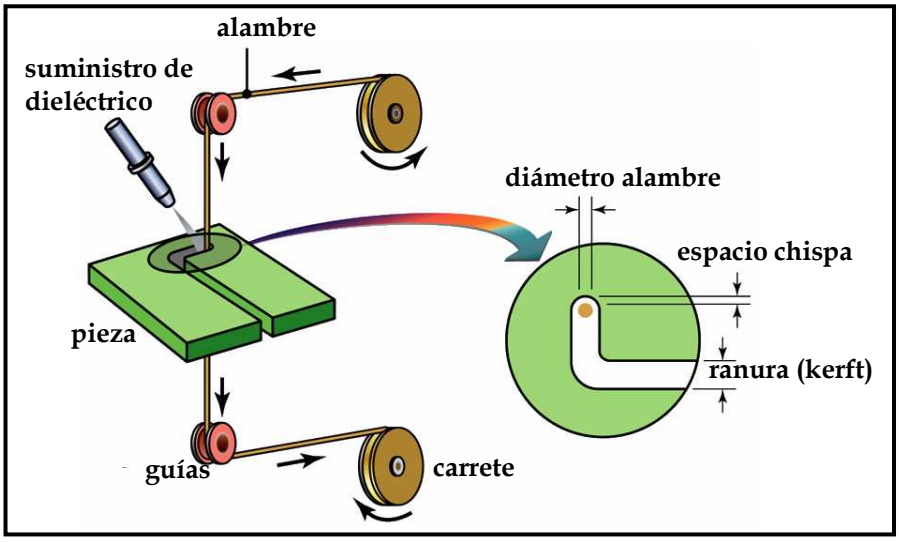



**Figura 197. Esquema del proceso de mecanizado por descarga eléctrica con alambre.** (Fuente [1])

El **alambre** suele ser de latón, cobre, tungsteno o molibdeno (algunos recubiertos con zinc o latón, o recubrimientos múltiples). Diámetros para desbaste de 0.3 mm; para acabado de 0.2 mm.

En este caso el desgaste del alambre tiene poca importancia, ya que éste se utiliza una vez (bajo coste), se desplaza a velocidad constante (0.15-9 m $min^{-1}$), pasando de un carrete a otro.

Actualmente, los **centros de mecanizado EDM con alambre de corte de ejes múltiples** son capaces de producir formas tridimensionales, presentan:

- Control numérico para la trayectoria del alambre.
- Control del ángulo del alambre respecto la pieza.
- Cabezales múltiples.
- Control anti-rotura de alambres.
- Auto-enhebrado de alambre en caso de rotura.

**Rectificado por descarga eléctrica (EDG):** en este caso el disco de rectificado está fabricado de grafito o latón y no contiene abrasivos. El material se elimina de la pieza de trabajo mediante descargas por chispas entre el disco rotatorio y la pieza. La dureza de la pieza de trabajo no representa ningún problema, las piezas frágiles no sufren deformaciones (no hay contacto entre la herramienta y la pieza) y se pueden mecanizar gran variedad de aleaciones. La herramienta se desgasta muy poco, permite tolerancias muy ajustadas.

## 8.6 Mecanizado ultrasónico

El mecanizado ultrasónico (UM) se elimina material de una superficie mediante microastillado y erosión con granos abrasivos, finos, sueltos en un lodo de agua.

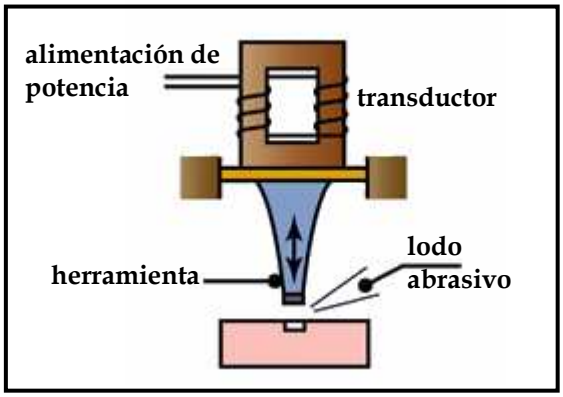



**Figura 198. Esquema del proceso de mecanizado ultrasónico. (Fuente [1])**

La punta de la **herramienta** (*sonotrodo*) vibra a alta frecuencia (20 kHz) y baja amplitud (0.0125-0.075 mm). Esta vibración hace que los granos abrasivos sueltos se muevan a gran velocidad entre la herramienta y la pieza de trabajo. El impacto de los granos abrasivos sobre la pieza de trabajo provoca el microastillado y la erosión de su superficie.

Este método es muy adecuado para materiales duros y frágiles (cerámicos, carburos, piedras preciosos y aceros endurecidos).

## 8.7 Mecanizado por rayo láser

El mecanizado por rayo láser (LBM) tiene como fuente de energía un LÁSER (amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación). La energía óptica se concentra en la superficie de la pieza de trabajo; con esta fuente de energía de alta densidad altamente concentrada se consigue vaporizar el metal de forma precisa y controlada. En este caso no se requiere trabajar en vacío. Esta técnica es válida para mecanizar materiales metálicos y no metálicos.

Algunos tipos de láser son: $CO_2$ (por pulsos u onda continua); Nd: YAG (neodinio: itrio-aluminio-granate); Nd: vidrio, rubí; Láseres Excimer (dímeros excitados).

La reflectividad y conductividad térmica de la pieza de trabajo, su calor específico y calores latentes de fusión y evaporación, son características fundamentales a tener en cuenta en este caso.

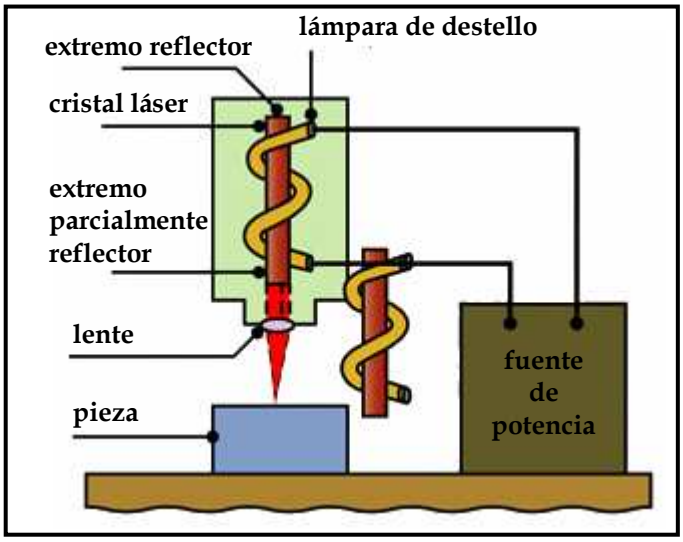



**Figura 199. Esquema del proceso de mecanizado por rayo láser. (Fuente [1])**

En este tipo de trabajos la superficie queda rugosa y presenta una zona afectada por el calor. La ranura de corte (kerft) debe tenerse en cuenta a la hora de programar el proceso de mecanizado.

En combinación con una corriente de gas (oxígeno) aumenta la absorción de energía (soplete de rayo láser), para cortar hojas metálicas.

En combinación con gas inerte a alta presión (nitrógeno o argón) para acero inoxidable y aluminio.

En general se utiliza para metales, no metales, cerámicos y composites. Se pueden obtener orificios muy pequeños (0.005 mm) con relación de profundidad:diámetro de 50:1.

Se puede cortar placas de acero de hasta 320 mm.

**Algunas consideraciones para el mecanizado por rayo láser:**

- Evitar esquinas agudas, difícil de obtener.
- Cortes profundos producen paredes cónicas.
- Es preferible que la superficie de la pieza de trabajo sea mate, sin pulir, baja reflectividad.
- Tener en cuenta el efecto de elevadas temperaturas localizadas en la pieza de trabajo.

## 8.8 Mecanizado por haz de electrones

En el mecanizado por haz de electrones (EBM) la fuente de energía consiste en electrones a alta velocidad. Estos electrones golpean la superficie de la pieza de trabajo, generando calor. Se utilizan voltajes entre 50-200 kV para acelerar los electrones (hasta al 80% de la velocidad de la luz). Aplicaciones similares al mecanizado por rayo láser.

Requiere de vacío (inconveniente frente al mecanizado por láser).

Es válido para el corte con precisión de una amplia gama de metales.

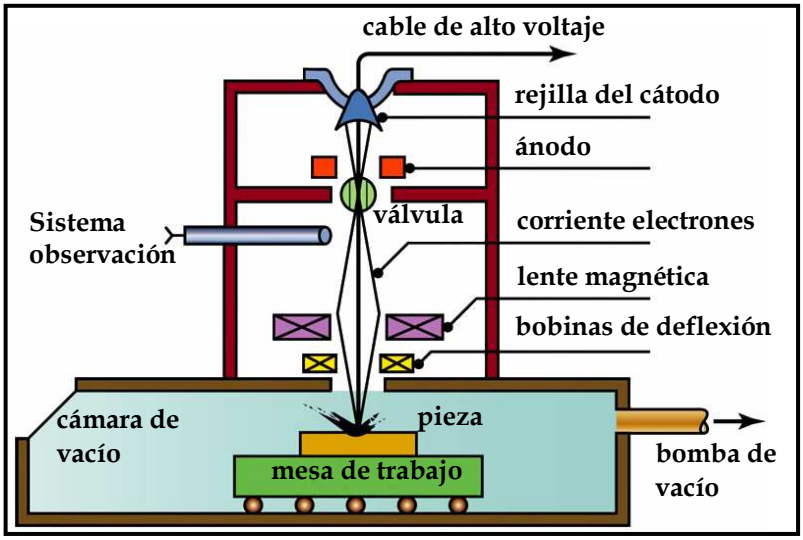



**Figura 200. Esquema del proceso de mecanizado por haz de electrones.** **(Fuente [1])**

**Corte por arco de plasma (PAC):** se utilizan haces de plasma (gas ionizado) para cortar láminas y placas metálicas (ferrosas y no ferrosas). Se obtienen temperaturas de hasta 9400ºC. Es un proceso muy rápido, la ranura de corte es pequeña y el acabado superficial bueno. Permite el corte de espesores de hasta 150 mm de espesor.

**Algunas consideraciones para el mecanizado por haz de electrones:**

- Factor limitante el tamaño de la cámara de vacío.

## 8.9 Mecanizado por chorro de agua

El chorro de agua (WJM) se utiliza como "una sierra". Se utilizan presiones de entre 400 MPa, para operaciones eficientes, hasta 1400 MPa. El diámetro de las boquillas son muy pequeños (0.05 a 1.00 mm).

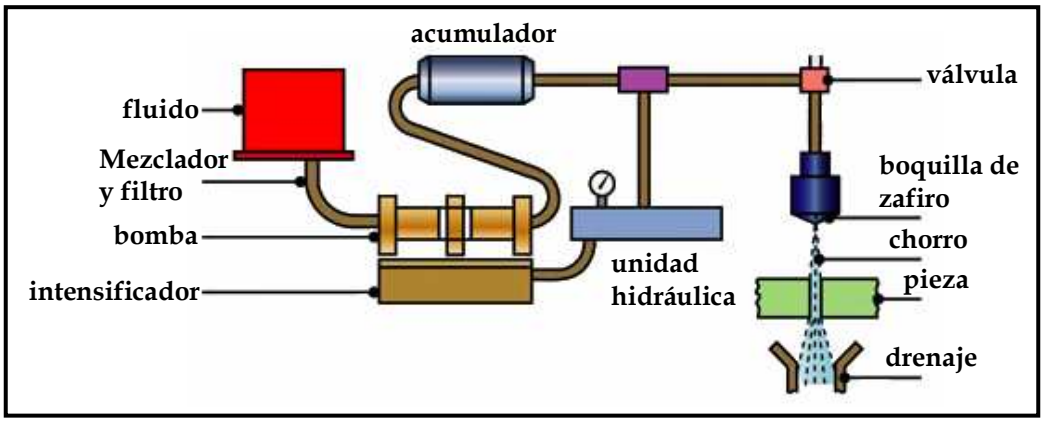



**Figura 201. Esquema del proceso de mecanizado por chorro de agua.** (Fuente [1])

Mediante este proceso se pueden cortar plásticos, textiles, madera, papel, piel, materiales aislantes, ladrillos, lana de roca, materiales compositos, piedra… Espesores de hasta 25 mm o superior, depende del material.

**Ventajas:**

- El corte se puede originar en cualquier lugar (sin necesidad de orificios previos).
- No produce calor.
- Apto para materiales flexibles.
- La pieza solo se moja ligeramente.
- Produce muy poca rebaba.
- Es ambientalmente seguro.

**Chorro de agua + abrasivo (AWJM):** el chorro de agua contiene partículas abrasivas (carburo de silicio, óxido de aluminio) que aumenta la velocidad de eliminación de material.

Apto para materiales metálicos y composites avanzados.

Muy adecuado para materiales muy sensibles al calor.

El tamaño mínimo de orificio perforado es de 3 mm; máxima profundidad de 25 mm.

## 8.10 Mecanizado por chorro abrasivo

En el mecanizado por chorro abrasivo (AJM) se utiliza un chorro de aire seco a alta velocidad (nitrógeno o dióxido de carbono) que contiene partículas abrasivas. El choque de las partículas contra la superficie de trabajo permite:

- Cortar pequeños orificios, ranuras o patrones en piezas metálicas y no metálicas, muy duros y frágiles.
- Retirar pequeñas partes o proyecciones de las piezas de trabajo.
- Recorte y biselado.
- Eliminar óxidos y otras capas superficiales.
- Limpieza en general de superficies.

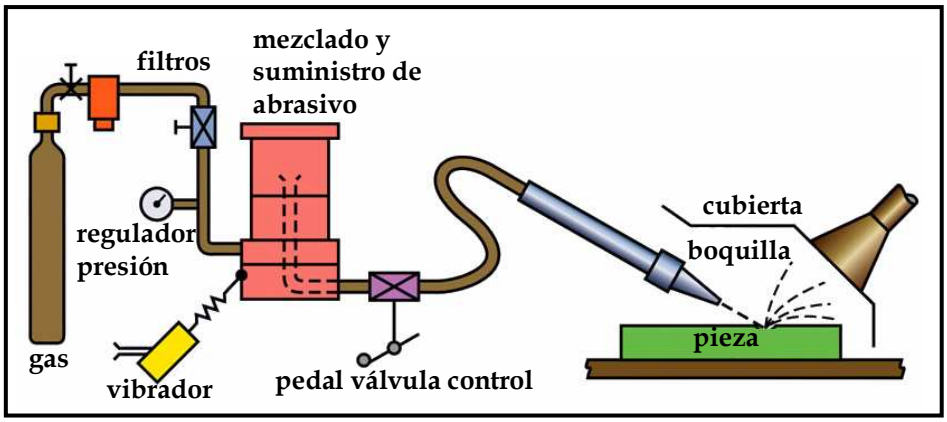



**Figura 202. Esquema del proceso de mecanizado por chorro abrasivo.** **(Fuente [1])**

Se utilizan presiones en torno a 850 kPa; la velocidad del chorro abrasivo puede ser de hasta 300 m $s^{-1}$; las boquillas suelen ser de carburo de tungsteno o de zafiro (alta resistencia al desgaste por el abrasivo); tamaño del abrasivo entre 10-50 µm.

# 9 TEMA 9: TECNOLOGÍAS DE SUPERFICIE. ACABADO SUPERFICIAL

## 9.1 Introducción

El contacto táctil y visual con la superficie de los objetos que nos rodean es fundamental para el usuario. Aspectos como la rugosidad, textura, ondulaciones, color, reflectividad, rayaduras, abolladuras, entre otros, pueden decidir la aceptación o no de un artículo.

Además, el acabado de las superficies puede afectar a propiedades como la vida útil ante la fatiga, la resistencia al rayado…

El acabado superficial en determinadas piezas es fundamental, sobretodo en aquellos componentes con capacidad de deslizamiento entre sí (pistón-cilindro, guías, rodillos, herramientas y matrices para corte y formado).

**Integridad superficial:** término que se utiliza para describir las características físicas, químicas y mecánicas de una superficie. Debido a todos los procesos que sufre una pieza durante su fabricación, la superficie de ésta suele tener propiedades significativamente diferentes al resto de su volumen. La superficie influye directamente en:

- Fricción y desgaste de herramientas, moldes, matrices y de los productos fabricados en ellos.
- Eficacia de los lubricantes (tanto durante la fabricación como en la vida útil de productos).
- Apariencia y rasgos geométricos.
- Operaciones como soldaduras, uniones con adhesivos, pintura, recubrimiento.
- Resistencia a la corrosión.
- Inicio de agrietamientos por defectos superficiales (rugosidad, raspaduras, costuras, zonas afectadas por el calor).
- Conductividad térmica y eléctrica de cuerpos en contacto (inferior en superficies rugosas que en superficies lisas).

En este tema hablaremos de:

- Estructura e integridad superficial.
- Textura y rugosidad superficial.
- Fricción.
- Desgaste.
- Lubricación.
- Tratamientos superficiales.
- Limpieza de superficies.
- Otros procesos de acabado superficial.

## 9.2 Estructura e integridad superficial

**Estructura:** si analizamos la superficie de una pieza metálica, por lo general nos encontraremos con las siguientes capas:

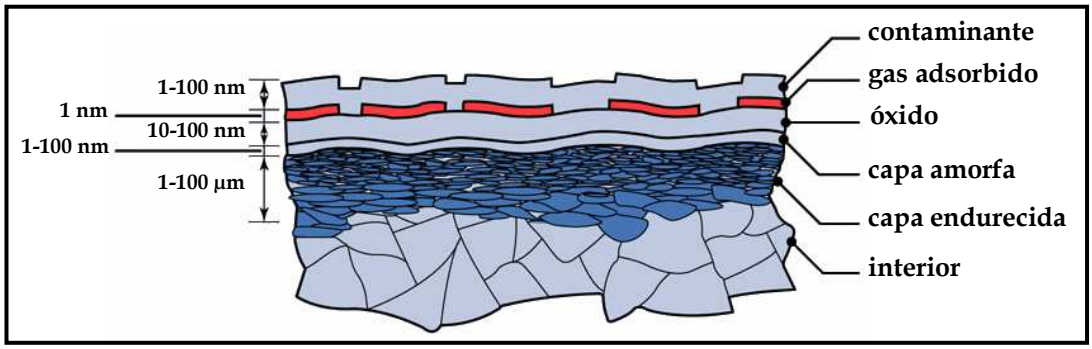



**Figura 203. Sección transversal de la estructura superficial de los metales procesados. (Fuente [1])**

1. **Metal interior:** depende de la composición y formación de esa pieza.
2. **Capa endurecida:** deformada plásticamente y endurecida por los trabajos realizados para el conformado de la pieza de trabajo (extrusión, forja, laminación…). Depende del tipo de trabajos realizados sobre la pieza.
3. **Capa de óxido:** salvo que el metal se haya procesado y almacenado en un ambiente inerte o sea un metal noble (oro o platino), es común la formación de capas de óxido en las piezas metálicas. El óxido suele ser más duro que el metal base, más abrasivo. Esta capa es muy importante a efectos de fricción, desgaste y lubricación.
4. **Gas adsorbido:** en condiciones normales, las capas de óxido suelen cubrirse de capas adsorbidas de gas y humedad.
5. **Contaminantes:** suciedad, polvo, grasa, restos de lubricantes…

**Integridad Superficial:** describe los rasgos geométricos (topología), propiedades físicas, químicas, mecánicas y metalúrgicas de las superficies. Influye en muchas propiedades como la resistencia a la fatiga, vida útil y corrosión. Los defectos en las superficies producidos durante la fabricación suelen ser causados por una combinación de:

- Defectos en material original.
- Método de trabajo con el que se obtiene la superficie.
- Falta de control en el proceso (esfuerzos excesivos, temperaturas excesivas, deformación superficial…).

Los principales **defectos superficiales** que nos podemos encontrar son:

- **Ataque intergranular:** debilitamiento de los límites de los granos causado por la fragilización y corrosión líquido-metal.
- **Cráteres:** depresiones profundas.
- **Deformación plástica superficial:** causada por esfuerzos elevados debidos a fricción, geometría de las herramientas y matrices, herramientas desgastadas y el propio método de fabricación.

- **Esfuerzos residuales:** causados por la deformación irregular y la distribución no uniforme de la temperatura.
- **Grietas:** externas o internas. Microgrietas, cuando se requiere ampliar 10× para verlas.
- **Inclusiones:** elementos o compuestos pequeños no metálicos.
- **Picaduras:** depresiones profundas (por ataque físico y químico).
- **Salpicaduras:** pequeñas partículas metálicas, fundidas y re-solidificadas, depositadas en la superficie (por ejemplo, durante la soldadura).
- **Transformaciones metalúrgicas:** cambios microestructurales provocados por ciclos de temperatura del material (re-cristalización, descarburado, material fundido y refundido, resolidificado…).
- **Traslapes, pliegues y costuras:** resultantes del solapamiento del material durante su fabricación.
- **Zona afectada por el calor:** partes de la superficie que se somete a ciclos térmicos sin fundirse.

## 9.3 Textura y rugosidad superficial

El conjunto de las características de la superficie de una pieza se conoce como **textura superficial**. La descripción de este concepto es complicada. En la Figura 204 se observan los principales términos utilizados para cuantificar la textura de una superficie. Sobre una superficie se pueden identificar tres características que pueden afectar a la rugosidad.

- Las ondulaciones con longitud de onda constante que se producen en la superficie. Están provocadas por la falta de rectitud o plenitud en los carros de avance que soportan las herramientas, que hace que los movimientos de la herramienta no sean exactamente los programados.
- Las huellas de la herramienta (claramente visibles en la superficie)
- Rugosidad microscópica, forma geométrica de valles y crestas que no están directamente provocados por ningún factor de los anteriores, sino por la propia rugosidad de la herramienta y por el proceso de fabricación que va conformando la superficie de la pieza.

**Imperfecciones:** irregularidades aleatorias.

**Direccionalidad o sesgo:** la dirección del modelo superficial predominante.

**Rugosidad:** conjunto de irregularidades de la superficie real.

**Ondulación:** desviación recurrente de una superficie plana. Se mide en función de la distancia entre crestas adyacentes de las ondas (*anchura de ondulación*) y la altura entre crestas y valles de las ondas (*altura de ondulación*).

La **rugosidad superficial** puede obtenerse de diversos métodos, algunos son:

- Valor medio aritmético $R_a$ (Fig. 205): $$R_a = \frac{a+b+c+d+\ldots}{n}$$
- Rugosidad de la raíz media cuadrática $R_q$ (Fig. 205): $$R_q = \sqrt{\frac{a^2+b^2+c^2+d^2+\ldots}{n}}$$

- Altura máxima de rugosidad $R_t$: altura entre la depresión más profunda y la cresta más elevada.

$R_a$ y $R_q$ no definen completamente la rugosidad de una superficie, ya que son valores medios, pueden existir superficies con los mismos valores para estos parámetros pero tener rugosidades completamente diferentes.

Cuando el departamento de diseño elabora las especificaciones de una pieza debe indicar sobre plano los requerimientos para el acabado superficial de forma inequívoca. Para tal fin se utiliza la simbología establecida en la normativa internacional.

Según la rugosidad deseada para determinada pieza se pueden acotar los procesos de fabricación capaces de conseguir determinado acabado, yendo desde la fundición en arena, el laminado en caliente, oxicorte y aserrado (algunos de los procesos que peor acabado superficial consiguen), hasta el pulido abrasivo o el pulido (como algunos de los procesos que mejor acabado proporcionan).

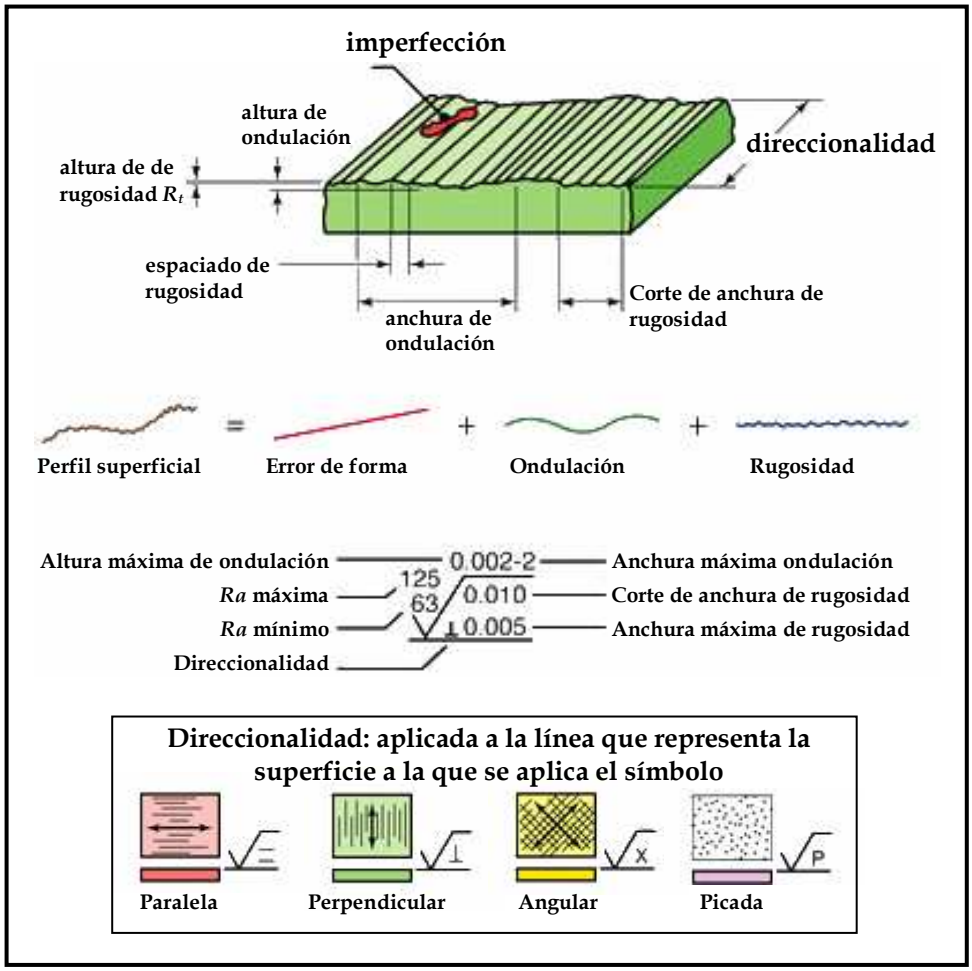



**Figura 204. Terminología y símbolos estándar para el acabado superficial.** **(Fuente [1])**

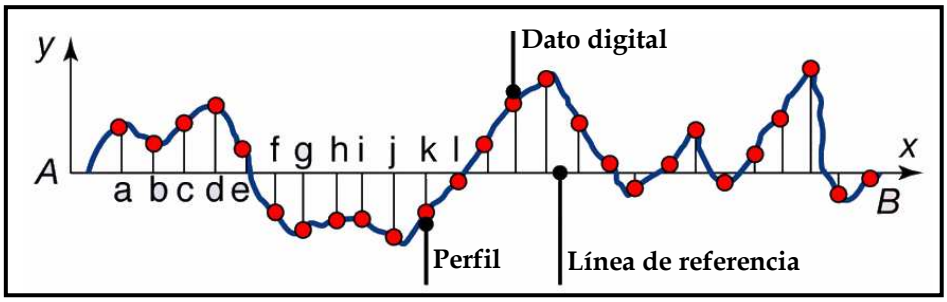



**Figura 205. Medida de la rugosidad superficial.** **(Fuente [1])**

**Medida de la rugosidad superficial:** se utilizan rugosímetros superficiales. Tienen una punta o *estilete de diamante* que avanza en línea recta sobre la superficie. A la distancia que avanza el estilete se le denomina **recorrido** (suele ir de 0.08 a 25 mm). En el recorrido deben incluirse al menos 10-15 irregularidades de la superficie y toda la ondulación superficial para dar la medida como buena.

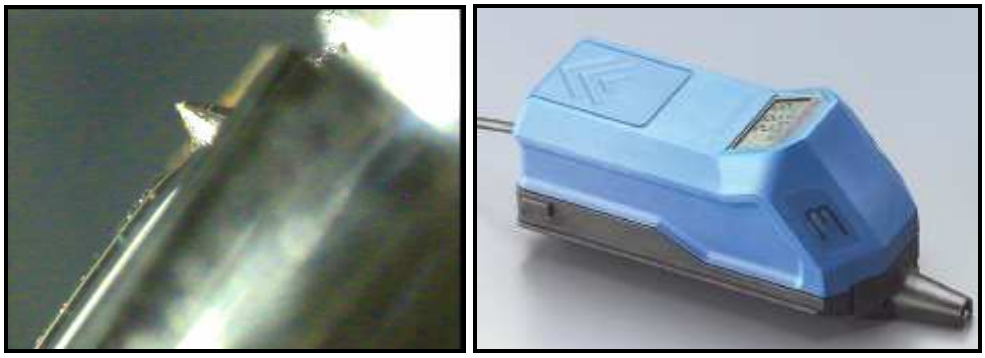


**Figura 206. Punta del rugosímetro (izq.) y rugosímetro (dcha.).**

Clases de rugosidades superficiales (aplicaciones en ingeniería):

**Tabla 13. Clases de rugosidades. Aplicaciones**

| CLASE | N12 | N11 | N10 | N9 | N8 | N7 | N6 | N5 | N4 | N3 | N2 | N1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $R_a$ (µm) | 50 | 25 | 12.5 | 6.3 | 3.2 | 1.6 | 0.8 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.025 |

| | |
|---|---|
| N1 | Espejos. Bloques patrón |
| N2 | Planos de apoyo de relojes comparadores |
| N3 | Herramientas de precisión. Cojinetes superacabados.<br>Acoplamientos estancos de alta presión en movimiento alternativo.<br>Superficies bruñidas de retención sin retén. |
| N4 | Soportes de cigüeñales y árboles de levas. Pies de válvulas.<br>Superficies de cilindros de bombas hidraúlicas.<br>Cojinetes lapeados. Pernos de árboles para rotores de turbinas, reductores... |
| N5 | Árboles acanalados. Superficie exterior de pistones.<br>Acoplamientos efectuados a presión.<br>Asientos de válvulas. |
| N6 | Tambores de freno. Agujeros brochados. Cojinetes de bronce.<br>Dientes de engranaje. Superficies de piezas deslizantes, como patines y sus guías. |
| N7 | Caras de engranajes. Árboles y orificios de engranajes.<br>Cara de émbolo. |
| N8 | Pernos y cojinetes para transmisión (montaje a mano).<br>Superficies de acoplamiento de partes fijas desmontables. |
| N9 | Superficies laterales de retención con retenes normales. |

## 9.4 Fricción

La fricción es muy importante en los procesos de fabricación por el movimiento relativo y fuerzas entre las herramientas y las piezas de trabajo:

- Disipa energía, generando calor.
- Impide el libre movimiento entre las partes.
- No siempre es indeseable: es imprescindible en procesos de laminación, para sujetar las herramientas y las piezas en las máquinas.

**Teoría de la adhesión** para explicar la fricción: dos superficies limpias y secas entran en contacto, tan sólo pequeñas partes de sus superficies son las que están en contacto (diminutas asperezas). Los esfuerzos normales en esas diminutas asperezas son muy grandes, lo que causa deformación plástica en las uniones → las asperezas forman microsoldaduras.

**Fuerza de fricción:** fuerza que hay que superar para conseguir el deslizamiento entre dos superficies en contacto. La fuerza de fricción F está relacionada con la fuerza normal a la superficie mediante el **coeficiente de fricción μ** (rozamiento) [**F = μ·N**]. Casi toda la energía utilizada para superar la fuerza de fricción se disipa en forma de calor, una pequeña parte de esa energía queda almacenada en regiones deformadas plásticamente.

**En plásticos y cerámicos:** la fricción suele ser muy inferior a en metales. Esto hace que sean más adecuados para rodamientos, engranajes, articulaciones protésicas y aplicaciones en general para reducción de la fricción.

**Reducción de la fricción:**

- Seleccionar materiales con bajos coeficientes de fricción.
- Uso de películas y recubrimientos superficiales.
- Uso de lubricantes.
- Uso de películas sólidas (como el grafito).
- Vibraciones ultrasónicas (el lubricante fluye mejor).

**Medida de la fricción:** el coeficiente de fricción se determina de forma experimental. Ejemplo: *prueba de compresión de anillo*, un anillo plano se comprime entre dos planchas planas, si la fricción es baja el diámetro interior y exterior del disco aumentan por igual, como si fuese un disco sólido; si la fricción es alta el diámetro interior se hace más pequeño.

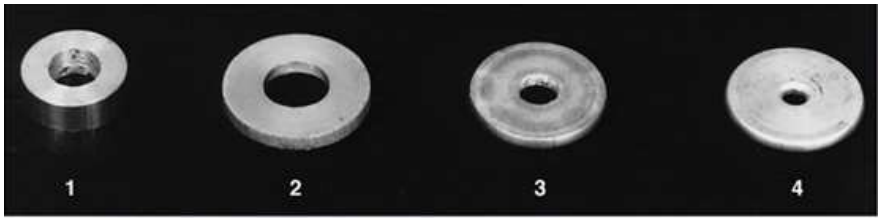



**Figura 207. Resultados de la prueba de compresión de anillo. 1, pieza original, de 2 a 4 aumenta la fricción. (Fuente [1])**

## 9.5 Desgaste

El desgaste tiene gran importancia en los procesos de fabricación (tecnológica y económicamente) ya que es responsable del cambio de la forma de las herramientas y matrices, afecta a la vida útil de éstas y a la calidad de las piezas obtenidas.

Principales mecanismos de desgaste (metales):

- **Desgaste adhesivo:** cuando entran en contacto las superficies de herramientas, matrices… con la pieza de trabajo se producen microsoldaduras entre éstas (en los diminutos puntos de contacto debido a la rugosidad). Si se aplica un movimiento tangencial a estas superficies (muy común en procesos de fabricación) se rompen estas microsoldaduras, produciéndose pérdida de material en forma de pequeñas partículas de desgaste. Las capas de óxido tienen un papel muy importante en este tipo de desgaste (actuando como película protectora).
- **Desgaste abrasivo:** este desgaste se produce cuando una superficie dura y rugosa (o una superficie que contenga partículas duras) se desliza por otra superficie más blanda. Se producen microvirutas o astillas, dejando muescas o raspaduras en la superficie más blanda.
- **Desgaste corrosivo (oxidación o desgaste químico):** causado por reacciones químicas o electroquímicas entre las superficies y el ambiente. Como producto de este desgaste se generan capas de productos corrosivos finos, si se elimina esa capa se vuelve a formar otra.
- **Desgaste por fatiga:** se produce cuando la superficie de un material se somete a cargas cíclicas (ejemplo, el contacto rotatorio en rodamientos). También existe el desgaste por fatiga térmica, se produce agrietamiento de las superficies al verse sometidas a ciclos térmicos (ejemplo, una matriz fría entra en contacto con piezas de trabajo calientes). Después estas grietas se unen y la superficie empieza a delaminarse, produciéndose desgaste por fatiga.
- **Desgaste por difusión:** átomos de una red cristalina de una región de alta concentración, se desplazan, siempre a altas temperaturas, a otra región de concentración atómica menor.
- **Desgaste por erosión:** partículas abrasivas *sueltas* desgastan las superficies.
- **Desgaste por vibración-corrosión:** superficies en contacto sometidas a movimientos relativos muy pequeños.
- **Desgaste por impacto:** el impacto de partículas en las superficies provocan la eliminación de material de éstas.

**Desgaste de plásticos:** muy similar al desgaste de los metales. Dado que los plásticos se pueden elaborar con un gran número de componentes, se pueden incluir lubricantes internos que se intercalan en el interior de la matriz del polímero.

**Desgaste de plásticos reforzados:** su resistencia al desgaste depende del tipo, cantidad y dirección del refuerzo en la matriz del polímero. Por ejemplo, las fibras de vidrio mejoran la resistencia al desgaste. El desgaste se produce cuando se extraen las fibras de la matriz. Si la dirección de deslizamiento es paralela a la dirección de las fibras el desgaste es mayor, pues se facilita la extracción de las fibras. Las fibras largas aumentan la resistencia al desgaste.

**Desgaste de los cerámicos:** al deslizar una pieza cerámica contra un metal, el desgaste se produce por: (i) deformación plástica a pequeña escala y fractura de superficies frágiles; (ii) reacciones químicas superficiales; (iii) surcado; (iv) fatiga.

## 9.6 Lubricación

Para reducir la fricción y el desgaste en las herramientas y matrices en procesos de fabricación se aplican **lubricantes**. Existen cuatro regímenes de lubricación:

- **Lubricación de película gruesa:** las superficies se separan por completo mediante una película de refrigerante. Estas películas se pueden obtener en algunas regiones de la pieza de trabajo, en operaciones de alta velocidad y con lubricantes de alta viscosidad.
- **Lubricación de película delgada:** se consigue al aumentar la carga entre la matriz y la pieza, al disminuir la velocidad y viscosidad del fluido. En este caso la fricción es mayor que en el primero.
- **Lubricación mixta:** parte de la carga entre la herramienta y la pieza es soportada por el contacto físico entre las asperezas de las superficies (rugosidad). El resto lo soportan películas de fluido atrapado en forma de bolsas (entre los valles de las asperezas, rugosidad).
- **Lubricación marginal:** se obtienen capas delgadas de lubricante (molecular) que son atraídas hacia las superficies metálicas, evitando el contacto directo metal-metal y reduciendo el desgaste.

**Materiales para lubricación:** deben reducir la fricción, reducir el desgaste, mejorar el flujo de material, actuar como refrigerante y ayudar a evacuar partes (por ejemplo en matrices y moldes).

- **Fluidos:** emulsiones, soluciones sintéticas y semisintéticas, jabones, grasas y ceras.
- **Aditivos:** que se añaden al fluido de lubricación: inhibidores de la oxidación, agentes antioxidantes, inhibidores de espuma, agentes humectantes, agentes para controlar olores, antisépticos.
- **Lubricantes sólidos:** algunos materiales sólidos se utilizan como lubricantes en operaciones de fabricación: el grafito, disulfuro de molibdeno, películas metálicas y poliméricas.
- **Recubrimientos de conversión:** cuando los lubricantes no se adhieren bien a las superficies de trabajo. Primero se transforma la superficie de trabajo mediante la aplicación de alguna reacción química (mediante ácidos), dejando una superficie rugosa y esponjosa que actúa como portadora del lubricante.

## 9.7 Tratamientos superficiales

Una vez fabricada una pieza, quizás sea necesario aplicar algún tratamiento superficial para:

- Mejorar la resistencia al desgaste, la erosión y la penetración.
- Controlar la fricción.
- Reducir la adhesión.
- Mejorar la lubricación (modificar las superficies para retener lubricantes).
- Mejorar la resistencia a la fatiga.
- Reconstruir superficies (para herramientas, matrices… desgastadas).
- Modificar texturas.
- Motivos decorativos (color y textura).

### 9.7.1 Tratamientos superficiales mecánicos

**Granallado:** la superficie tratada recibe el impacto de una gran cantidad de granallas (bolas pequeñas desde 0.125 a 5 mm de diámetro) de acero fundido, vidrio o cerámicas, que producen penetraciones en la superficie. Los impactos producen deformación plástica (no uniforme) de la superficie hasta profundidades de 1.25 mm. Esta acción produce esfuerzos residuales comprensivos sobre la superficie, mejorando la vida útil a la fatiga, retardando la aparición de grietas por fatiga.

**Granallado con láser:** en este caso se producen impactos por pulsos de láser de alta potencia.

**Granallado a chorro de agua:** un chorro de agua a presiones de hasta 400 MPa choca con la superficie de la pieza, induciendo esfuerzos residuales de compresión y endurecimiento superficial.

**Granallado ultrasónico.**

**Bruñido con rodillo (laminado superficial):** la superficie de la pieza se trabaja en frío con un rodillo (o juego de rodillos) duro y muy pulido. Se mejora el acabado superficial eliminando raspaduras, marcas de herramientas y picaduras; también produce esfuerzos residuales de compresión. Aumenta la resistencia a la corrosión (al reducir la capacidad de retener productos y residuos corrosivos). **Boleado o bruñido con bolas:** se introduce una bola lisa por el orificio que se quiera trabajar internamente (diámetro de la bola ligeramente superior al del orificio).

**Endurecimiento por explosión:** se somete a una superficie a altas presiones transitorias mediante la colocación y detonación de una lámina explosiva sobre la superficie de trabajo.

### 9.7.2 Deposición y revestimiento mecánico

**Deposición mecánica:** se compactan partículas metálicas finas sobre la superficie mediante la acción de perlas de vidrio, cerámica o porcelana por medios giratorios (como tamboreo).

**Revestimiento mecánico (unión por chapeado):** se adiciona una delgada capa de metal anticorrosivo mediante la aplicación de presión mediante rodillos u otros medios.

**Revestimiento con láser:** fusión de un material diferente sobre la superficie.

### 9.7.3 Endurecimiento superficial y recubrimiento duro

Endurecimiento de las superficies por medios térmicos (mejorar propiedades de fricción, desgaste, resistencia a la penetración, erosión, abrasión y corrosión).

**Endurecimiento superficial:** carburación, carbonitruración, cianuración, nitruración, endurecimiento por soplete y endurecimiento por inducción. Además del gas y la electricidad como fuente de calor se puede utilizar haces de electrones o rayo láser.

**Recubrimiento duro:** una capa delgada, un filo o punta de metal duro (resistente al desgaste) se deposita sobre la superficie de la pieza mediante técnicas de soldadura de fusión.

**Endurecimiento por chispa:** se realizan recubrimientos de carburos de tungsteno, cromo o molibdeno mediante arco eléctrico.

### 9.7.4 Rociado térmico

El recubrimiento (metales, aleaciones, carburos, cerámicos o polímero) se aplica a una superficie de metal mediante una pistola de rociado con una llama oxiacetileno, arco eléctrico o arco de plasma. El material de recubrimiento puede dosificarse en forma de alambre, varilla o polvo.

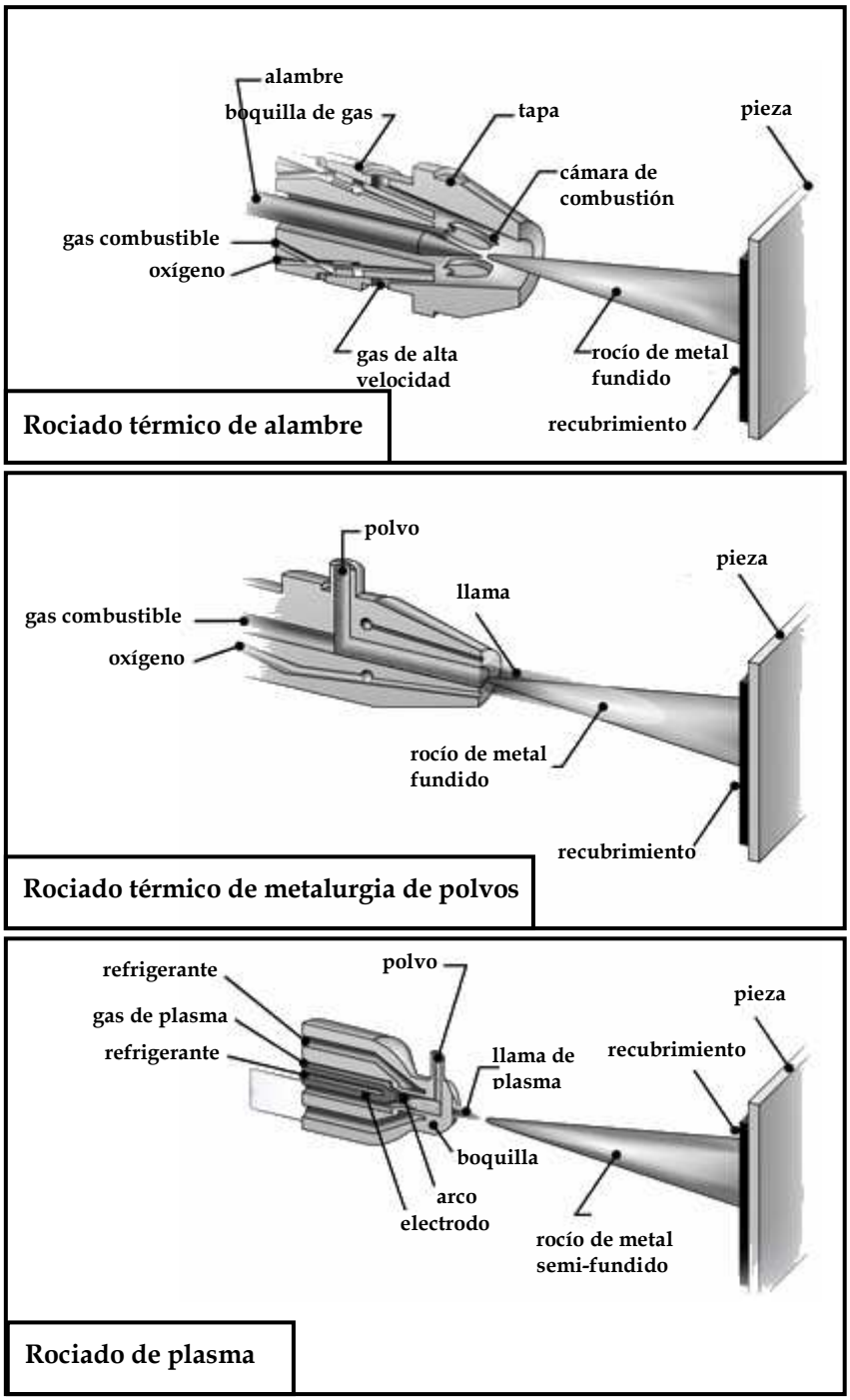



**Figura 208. Esquemas de operaciones de rociado térmico.** **(Fuente [1])**

**A. Rociado de combustión:**

- **Rociado térmico de alambre:** una llama de oxiacetileno funde un alambre y lo deposita sobre la superficie.
- **Rociado térmico de metalurgia de polvos:** similar al anterior pero utiliza polvos en vez de alambre.
- **Cañón detonante:** se producen explosiones controladas y repetidas con mezcla oxiacetileno.
- **Rociado de gas de oxiacetileno de alta velocidad.**

**B. Rociado de eléctrico:**

- **Arco de cable bifilar:** se forma un arco entre dos electrodos de alambre consumible.
- **Rociado de plasma:** convencional, de alta energía o en vacío.

**C. Rociado en frío:** las partículas que se rocían están a menor temperatura y no llegan a fundirse.

### 9.7.5 Deposición de vapor

La superficie de la pieza de trabajo se somete a reacciones químicas mediante gases que contienen compuestos químicos del material a depositar. El espesor del recubrimiento suele ser de pocos μm. Se pueden depositar metales, aleaciones, carburos, nitruros, boruros, cerámicos u óxidos. El sustrato puede ser metal, vidrio, plástico o papel.

**A. Deposición física de vapor:** se realizan con alto vacío y temperaturas entre 200-500ºC. Las partículas a depositar se transportan físicamente hasta la superficie de trabajo.

- **Deposición de vacío:** el material de recubrimiento se evapora a alta temperatura en vacío y se deposita en la pieza de trabajo, que suele estar a temperatura ambiente para mejorar la unión. La evaporación del metal se puede hacer mediante arco eléctrico. El arco produce un plasma altamente reactivo (vapor ionizado del material de recubrimiento). Este vapor se condensa sobre la pieza de trabajo (ánodo) y lo recubre.
- **Chisporroteo o pulverización catódica:** un campo eléctrico ioniza un gas inerte (argón), los iones positivos bombardean el material de recubrimiento (cátodo) y produce un chisporroteo (expulsión) de sus átomos. Estos átomos del material de recubrimiento se condensan posteriormente sobre la pieza de trabajo (ánodo).

**B. Deposición química de vapor:** proceso termoquímico. La pieza de trabajo se coloca en una bandeja de grafito (dentro de un horno) y se calienta hasta 950-1050ºC a presión atmosférica y en atmósfera inerte. Después se introduce tetracloruro de titanio (vapor), hidrógeno y nitrógeno en la cámara. Las reacciones químicas forman nitruro de titanio sobre las superficies de la pieza.

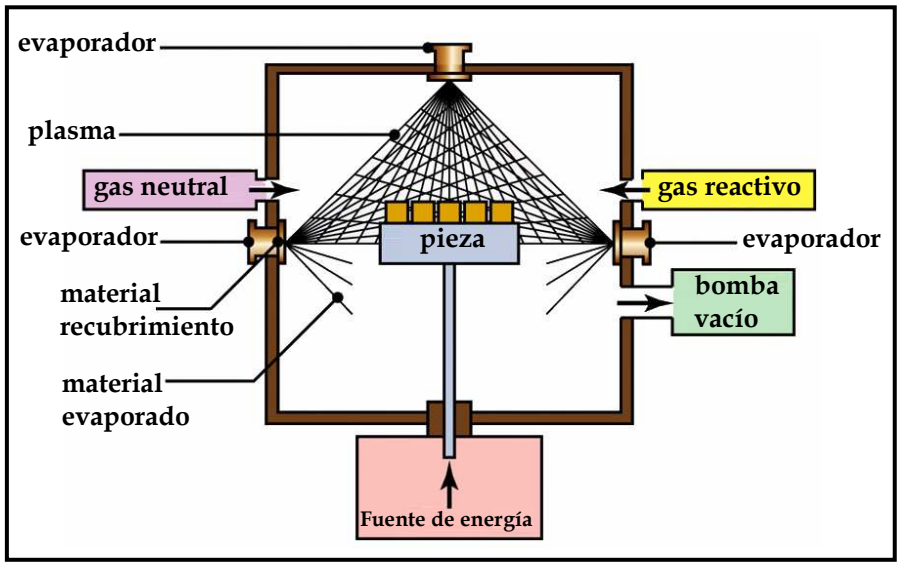



**Figura 209. Esquema del proceso de deposición física de vapor.** **(Fuente [1])**

### 9.7.6 Electrodeposición, deposición sin electricidad y electroformado

La deposición proporciona propiedades de resistencia al desgaste, a la corrosión, alta conductividad eléctrica, mejor apariencia, reflectividad, entre otras.

**Electrodeposición:** la pieza de trabajo (cátodo) se recubre con un metal diferente (ánodo) que se transfiere mediante una solución electrolítica base agua. El proceso consiste básicamente en:

- Los iones metálicos del ánodo se descargan utilizando la energía potencial de la fuente externa de electricidad.
- Los iones metálicos se disuelven en la solución.
- Se depositan en el cátodo.

**Deposición sin electricidad:** se efectúa mediante una reacción pero sin una fuente externa de electricidad. Como material de recubrimiento se utiliza principalmente níquel o cobre. En el caso del níquel, se utiliza cloruro de níquel (sal metálica), se reduce (utilizando hiposofito de sodio) a metal níquel, que después se deposita en la pieza de trabajo.

**Electroformado:** en realidad es un proceso de fabricación. El material se deposita en un molde o matriz que después se retira. El recubrimiento será la pieza final. Similar al moldeo a la cera perdida.

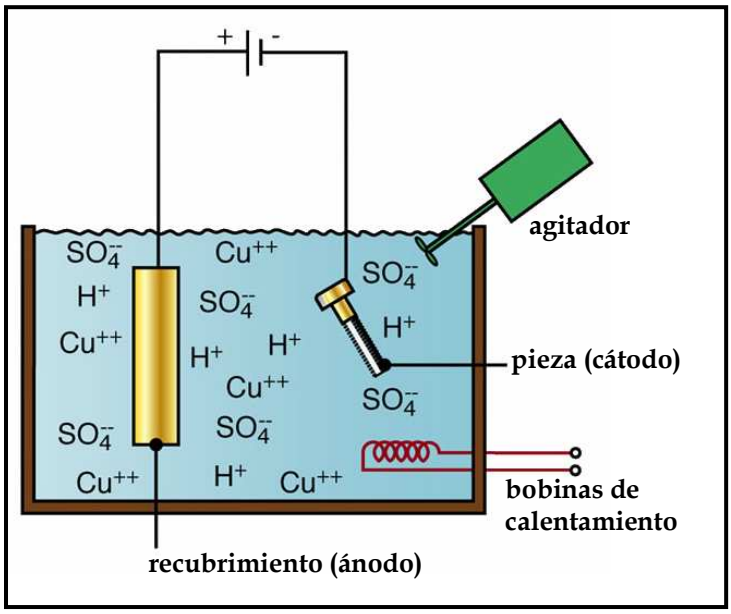



**Figura 210. Esquema del proceso de electrodeposición.** **(Fuente [1])**

### 9.7.7 Recubrimiento de conversión

**Anodinado:** proceso de oxidación (oxidación anódica) en el que las superficies de la pieza de trabajo se convierten en una capa dura y porosa de óxido que proporciona resistencia a la corrosión y un acabado decorativo. La pieza de trabajo (ánodo) se introduce en una celda electrolítica inmersa en un baño de ácido, se produce una adsorción de oxígeno del baño.

**Coloración:** se altera el color de los metales, aleaciones y cerámicos. El cambio se produce mediante la conversión de superficies (por procesos químicos, electroquímicos o térmicos) en compuestos químicos como óxidos, cromatos y fosfatos.

### 9.7.8 Inmersión en caliente

Se proporciona resistencia a la corrosión. La pieza de trabajo (acero o hierro) se sumerge en un baño de metal fundido:

- Zinc: para láminas de acero galvanizado y accesorios de plomería.
- Estaño: para hojalata y latas de estaño para alimentos.
- Aluminio (aluminización).
- Terne: aleación de plomo con 10% a 20% de estaño.

### 9.7.9 Esmaltado de porcelana; recubrimientos cerámicos y orgánicos

Los metales pueden recubrirse con recubrimientos de vidrio (vítreos) para darles resistencia a la corrosión, a la electricidad y para tener protección a las temperaturas elevadas.

**Esmaltes:** los esmaltes de porcelana son recubrimientos inorgánicos vidriados que consisten en diversos óxidos metálicos que están disponibles en diferentes colores y transparencias. El esmaltado comprende la fusión del material de recubrimiento con el sustrato cuando se calienta a 425-1000ºC. El esmaltado se puede aplicar por inmersión, rociado o electrodeposición. Los espesores suelen ir de 0.05 a 0.6 mm.

**Recubrimientos cerámicos:** materiales como los polvos de metales duros, óxidos de aluminio y óxido de zirconio se aplican al sustrato a temperatura ambiente utilizando aglutinantes. Estos recubrimientos actúan como barreras térmicas o para darle a la pieza resistencia a la electricidad.

**Recubrimientos orgánicos:** las superficies metálicas se pueden recubrir con varios recubrimientos, películas o laminados orgánicos para mejorar la apariencia y dar resistencia a la corrosión.

## 9.8 Limpieza de superficies

**Limpieza mecánica:** consiste en perturbar físicamente los contaminantes mediante cepillos de alambres o fibras, chorros de abrasivo, chorros de vapor, limpieza ultrasónica…

**Limpieza electrolítica:** a la parte a limpiar se le aplica una solución acuosa (alcalina) que produce burbujas de hidrógeno u oxígeno; estas burbujas se liberan en la superficie de la pieza, son abrasivas y ayudan a retirar los contaminantes.

**Limpieza química:** principalmente se utiliza para eliminar aceite y grasa de las superficies:

- **Solución:** la suciedad se disuelve en una solución de limpieza.
- **Saponificación:** reacción química que convierte los aceites animales y vegetales en jabón soluble en agua.
- **Emulsificación:** la solución de limpieza reacciona con la suciedad a eliminar y forma una emulsión.
- **Dispersión:** la concentración de suciedad en la superficie disminuye mediante elementos activos superficiales en la solución de limpieza.
- **Agregación:** se remueven lubricantes de la superficie mediante varios agentes en el limpiado y se reúnen como partículas de mugre grandes.

## 9.9 Otros procesos de acabado superficial

**Pulido con abrasivo pastoso:** eliminación de una capa muy fina de material por la acción de un abrasivo pastoso que se hace rozar sobre la superficie de la pieza a pulir con unas condiciones de trabajo muy específicas. La herramienta no elimina material directamente, sino que empuja al abrasivo pastoso a velocidad y presión controladas durante todo el proceso para obtener un acabado uniforme.

**Acabado de agujeros:** se utilizan herramientas abrasivas que si eliminan material para trabajar interiormente agujeros. Se aplica algún fluido refrigerante y que ayuda a eliminar partículas.

**Pulido y bruñido:** tienen como objetivo mejorar el acabado superficial sin disminución apreciable de las dimensiones de la pieza. En este tipo de trabajos solo se trabaja sobre las crestas de la superficie (rugosidad) y no arrancan material de los valles.

# 10 BIBLIOGRAFÍA

[1] Kalpakjian, S.; Schmid, S.R. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 2008. 5ª Edición, Pearson Educación, México. Capítulos 30, 31 y 32.

[2] Espinosa, M.M. *Introducción a los Procesos de Fabricación*. 2000. 1ª Edición, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Madrid (España).

[3] Barrientos, A.; Peñin, L.F.; Balaguer, C.; Aracil, R. *Fundamentos de Robótica*. 2007. 2ª Edición, McGraw-Hill.

[4] Sevilla, L.; Martín, M.J. *Metrología Dimensional*. 2002. 1º Edición, Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la Universidad de Málaga, Málaga (España).

[5] Manual y Programa SolidWorks Premiun 2010 (Dassault Systèmes SolidWorks Corp; Concord, Massachussets, EE.UU.).

[6] Manual y Programa SolidCam 2010 (SolidCAM Inc.; Newtown, EE.UU).

[7] Manual de la Máquina de Oxicorte ESAB (FALCON FXA).

[8] Manual Software "Lantek" de la Máquina de Oxicorte.

[9] Manual de programación ProtoTRAK® SLX CNC para tornos Proturn SLX. Southwestern Industries, Inc.

[10] Manual Operativo Sinumerik 802 S/C; Sinumerik 810D/840D/840Di; Sinumerik 802S base line; Sinumerik 802C base line. Siemens AG.