

# Proyecto Fin de Máster Ingeniería Aeronáutica

Programación en VBA-Excel del método estimativo  
de costes de fabricación, por DFMA.

Autor: María Luz Castro Pérez

Tutor: Luis Valentín Bohórquez Jiménez

**Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016





Proyecto Fin de Carrera  
Máster en Ingeniería Aeronáutica

# **Programación en VBA-Excel del método estimativo de costes de fabricación, por DFMA.**

Autor:

María Luz Castro Pérez

Tutor:

Luis Valentín Bohórquez Jiménez

Profesor Contratado Doctor

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Carrera: Programación en VBA-Excel del método estimativo de costes de fabricación, por  
DFMA

Autor: María Luz Castro Pérez

Tutor: Luis Valentín Bohórquez Jiménez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*



# Agradecimientos

---

Gracias a mi familia, amigos y a los profesores que realmente tienen vocación y saben transmitir, y por último, eternamente agradecido a aquellas personas que me han enseñado como no hay que ser.

*María Luz Castro Pérez*

*Sevilla, 2016*



El diseño para la fabricación y el ensamblaje (DFMA) consiste en una combinación del diseño para la fabricación (DFM) y el diseño para el montaje (DFA), como dice Ioan Marinescu en su libro *“Product Design for Manufacture and Assembly”*, en el cual está basado el presente proyecto.

Hay unas directrices para el diseño de piezas que claramente ahorran tiempo y dinero si se aplican correctamente, siempre hay que pensar hacia donde se va, con esto quiero decir, aplicado a este contexto, que hay que analizar con antelación cómo se van a fabricar y a montar el conjunto de partes que conforman una pieza, en la etapa en la que se está diseñando dicha pieza. Son muchas las decisiones a tener en cuenta, entre ellas la elección correcta del material a utilizar y por consiguiente la elección del proceso mediante el que se llevará a cabo el moldeo la pieza deseada, y todo está relacionado entre sí, con el único fin de la minimización de costes.

En este proyecto se estudiarán los principios fundamentales en los cuales se basa el DFMA y se aplicará al cálculo estimativo de los costes de fabricación de piezas por tres procesos diferentes, moldeo mediante mecanizado, inyección de plásticos y forjado. El cálculo de los costes se llevará a cabo con las herramientas de cálculo Visual Basic y Excel.

Finalmente, se compararán los costes obtenidos para la fabricación de una pieza determinada, usando los tres procesos, y en cada caso con los materiales y características adecuadas al proceso.



# Abstract

---

Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) consists of a combination of design for manufacturing (DFM) and design for assembly (DFA), as Ioan Marinescu says in his book "*Product Design for Manufacture and Assembly*", in which this project is based.

There are guidelines for the design of parts that clearly save time and money if they are applied correctly, you always have to think where you are going, with that I mean, applied to this context, that you have to analyze in advance how they are going to be manufactured and assemble the set of parts that make up a part, in the stage in which the piece is being designed. There are many decisions to take into account, including the correct choice of material to be used and therefore the choice of the process by which the molding will take place, and everything is related to each other, for the sole purpose of the minimization of costs.

This project will study the fundamental principles on which the DFMA is based and will be applied to the estimation of cost of manufacturing parts by three different processes, molding by machining, injection of plastics and forged. The calculation of the costs will be carried out with the calculation tool Visual Basic and Excel.

Finally, we will compare the costs obtained for the manufacture of a particular part, using the three processes, and in each case with the materials and characteristics appropriate to the process.



# Objetivos

---

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es el cálculo estimativo de los costes de fabricación de piezas mediante tres procesos de moldeo diferentes, mecanizado, inyección de plásticos, y forja.

Por lo tanto se van a realizar tres programas de cálculo en Excel, VBA, para la estimación de los costes de fabricación de piezas, siguiendo el guion de cálculo propuesto en el libro “*Product Design for Manufacture and Assembly*”. El objetivo principal de este trabajo es la estimación de los costes de fabricación sin saber cuál serán las características finales de la pieza deseada, es decir una primera estimación en la cual se conocen muy pocos datos de la pieza que se quiere realizar.

Finalmente, a modo de ejemplo se mostrarán los resultados de los costes obtenidos por los programas de cálculo para una pieza determinada, pudiéndose hacer una comparativa de que proceso es más beneficioso a simple vista, siempre teniendo en cuenta que aunque un proceso resulte más económico que otro, puede ser que dependiendo de la forma de la pieza deseada, no sea el más adecuado, ya bien sea por el propio proceso o el material.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xixiii
Objetivos	xv
Índice	xvi
Índice de Tablas y Gráficos	xxix
Índice de Figuras	xxi
<b>1. INTRODUCCIÓN AL DFMA.</b>	<b>23</b>
1.1. ¿Qué es el diseño para fabricación y montaje?.	23
1.2. ¿Cómo funciona DFMA?.	26
1.3. Razones para no implementar DFMA.	28
1.4. ¿Cuáles son las ventajas de aplicar DFMA durante el diseño del producto?.	29
1.5. Conclusiones.	29
<b>2. SELECCIÓN DE MATERIALES Y PROCESOS.</b>	<b>30</b>
2.1. Introducción.	30
2.2. Requisitos generales para la selección anticipada de materiales y procesos.	31
2.3. Selección de procesos de fabricación.	32
2.4. Capacidades de proceso.	34
2.5. Selección de materiales.	34
2.6. Selección primaria de procesos/materiales	35
2.7. Selección sistemática de procesos y materiales.	35
2.7.1. Selección primaria de procesos/materiales.	36
2.7.2. Selector de secuencia de procesos experto.	37
2.7.3. Clasificación económica de procesos.	38
<b>3. MECANIZADO.</b>	<b>42</b>
3.1. Introducción.	42
3.2. Mecanizado utilizando herramientas de corte único.	42
3.3. Mecanizado con herramientas de varios puntos.	44
3.4. Mecanizado con muelas de rectificado.	45
3.5. Estimación de los costes de fabricación de una pieza mediante mecanizado.	46
3.5.1. Material de trabajo.	46
3.5.1.1. Coste del material.	47
3.5.2. Coste por mecanizado.	47
3.5.2.1. Tiempo de mecanizado.	48
3.5.2.2. Costes por operación de torneado y fresado.	49
3.5.3. Costes por operación de rectificado basto.	49
<b>4 INYECCIÓN DE PLÁSTICOS.</b>	<b>50</b>
4.1. Introducción.	50
4.2. Materiales de moldeo por inyección.	50
4.3. El ciclo de moldeo.	51

4.4.	<i>Sistema de moldeo por inyección.</i>	52
4.5.	<i>Moldes de inyección.</i>	53
4.6.	<i>Estimación de costes de fabricación de una pieza mediante moldeo por inyección de plásticos.</i>	53
4.6.1.	<i>Costes de fabricación del molde.</i>	53
4.6.1.1.	<i>Coste de la base del molde.</i>	53
4.6.1.2.	<i>Coste de las cavidades y machos.</i>	54
4.6.2.	<i>Costes del polímero.</i>	56
4.6.3.	<i>Costes de operación.</i>	57
4.6.4.	<i>Costes totales.</i>	57
<b>5.</b>	<b>FORJA.</b>	<b>58</b>
5.1.	<i>Introducción.</i>	58
5.2.	<i>Características del proceso de forja.</i>	58
5.2.1.	<i>Tipos de proceso de forja.</i>	58
5.3.	<i>El papel de la rebaba en la forja.</i>	58
5.3.1.	<i>Determinación de la geometría de la zona de la rebaba.</i>	59
5.3.2.	<i>Cantidad de rebaba.</i>	59
5.3.3.	<i>Membranas.</i>	59
5.4.	<i>Material de exceso.</i>	59
5.5.	<i>Preformas durante la forja.</i>	60
5.5.1.	<i>Diseño del dado.</i>	60
5.6.	<i>Eliminación de la rebaba.</i>	61
5.7.	<i>Clasificación de las forjas.</i>	61
5.7.1.	<i>Complejidad de las forjas.</i>	62
5.8.	<i>Equipos de forja.</i>	63
5.9.	<i>Clasificación de materiales.</i>	63
5.10.	<i>Costes de la forja.</i>	64
5.11.	<i>Estimación de costes de fabricación de una pieza mediante forjado.</i>	64
5.11.1.	<i>Cálculos previos.</i>	64
5.11.2.	<i>Costes del material.</i>	65
5.11.3.	<i>Costes de producción.</i>	65
5.11.4.	<i>Costes de la puesta a punto de la máquina.</i>	66
5.11.5.	<i>Costes del dado.</i>	67
5.11.6.	<i>Vida del dado y costes del cambio de herramienta.</i>	68
5.11.7.	<i>Costes de la eliminación de la rebaba.</i>	69
5.11.8.	<i>Costes de las herramientas.</i>	69
5.11.9.	<i>Coste final de la pieza.</i>	70
<b>6.</b>	<b>MANUAL DE USO DE LOS PROGRAMAS.</b>	<b>71</b>
6.1.	<i>Introducción.</i>	71
6.2.	<i>Manual de uso del programa de mecanizado.</i>	75
6.2.1.	<i>Valores estimados inicialmente (Mecanizado).</i>	75
6.3.	<i>Manual de uso del programa del moldeo por inyección de plásticos.</i>	75
6.3.1.	<i>Valores estimados inicialmente (Inyección de plásticos).</i>	76
6.4.	<i>Manual de uso del programa de moldeo mediante forjado.</i>	76
6.4.1.	<i>Valores estimados inicialmente (Forjado).</i>	77
<b>7.</b>	<b>CÓDIGOS VBA USADOS EN CADA PROGRAMA.</b>	<b>78</b>
7.1.	<i>Introducción.</i>	78
7.2.	<i>Códigos usados en la programación de la estimación de costes mediante un proceso de mecanizado.</i>	78
7.3.	<i>Códigos usados en la programación de la estimación de costes mediante un proceso de moldeo por inyección de plásticos.</i>	86
7.4.	<i>Códigos usados en la programación de la estimación de costes mediante un proceso de moldeo por forjado.</i>	90

<b>8. COMPARATIVA.</b>	<b>95</b>
8.1. <i>Datos de la pieza a fabricar.</i>	95
8.2. <i>Estimación de costes mediante un proceso de mecanizado.</i>	96
8.3. <i>Estimación de costes mediante un proceso de moldeo por inyección de plásticos.</i>	97
8.4. <i>Estimación de costes mediante un proceso de moldeo por forjado.</i>	98
<b>9. CONCLUSIONES.</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO A. TABLAS Y GRÁFICOS UTILIZADOS PARA EL MECANIZADO.</b>	<b>100</b>
A.1. <i>Costes del material.</i>	100
A.2. <i>Tablas generales para tiempos no productivos y gráfico de potencia necesaria.</i>	101
A.3. <i>Costes por operación de torneado.</i>	102
A.4. <i>Costes por operación de fresado.</i>	103
A.5. <i>Costes por operación de rectificado basto.</i>	103
<b>ANEXO B. TABLAS Y GRÁFICOS UTILIZADOS PARA EL MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICOS.</b>	<b>104</b>
B.1. <i>Materiales termoplásticos.</i>	104
B.2. <i>Dimensionado de la máquina inyectora.</i>	104
B.3. <i>Costes adicionales.</i>	105
<b>ANEXO C. TABLAS Y GRÁFICOS UTILIZADOS PARA EL MOLDEO MEDIANTE FORJADO.</b>	<b>107</b>
C.1. <i>Costes del material.</i>	107
C.2. <i>Clasificación del tipo de forja y etapas.</i>	108
C.3. <i>Costes de eliminación de la rebaba.</i>	111
C.4. <i>Costes de producción.</i>	111
<b>Referencias</b>	<b>112</b>

# ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICOS

---

Tabla 1.1. Costes estimados en dólares para los dos ejemplos de la ilustración 1.2 si se fabrican 100.000 unidades.	25
Tabla 3.1. Materiales típicos para procesos de mecanizado.	46
Tabla 4.1. Polímeros comúnmente utilizados en el moldeo por inyección.	51
Tabla A.1.1. Diferentes materiales utilizados para el proceso de mecanizado.	100
Tabla A.1.2. Coste del material en \$/lb en función del material y de la forma base.	100
Tabla A.2.1. Tiempo (s) carga y descarga en función del dispositivo de sujeción.	101
Tabla A.2.2. Tiempos no productivos para maquinas herramientas comunes.	101
Gráfico A.2.3. Potencia necesaria en función del peso de la pieza.	102
Tabla A.3.1. Torneado. Velocidad por el avance y potencia específica de corte para diferentes tipos de herramientas y tipo de operación en función del material.	102
Tabla A.4.1. Fresado. Velocidad por el avance y potencia específica de corte para diferentes tipos de herramientas y tipo de operación en función del material.	103
Tabla A.5.1. . Rectificado basto. Tasa de material eliminado y potencia específica de corte en función del material.	103
Tabla B.1.1. Materiales termoplásticos típicos para el moldeo por inyección de plásticos con algunas de sus propiedades.	104
Tabla B.2.1. % del área correspondiente al sistema de alimentación en función del part volumen.	104
Tabla B.2.2. Características de las diferentes máquinas de molde por inyección.	105
Tabla B.2.3. Tiempo de operación de sujeción de la máquina (s).	105
Tabla B.3.1.% de incremento sobre las horas de fabricación total del molde para diferentes niveles de apariencia.	105
Tabla B.3.2. % de incremento sobre las horas de fabricación total del molde para diferentes niveles de tolerancia.	105
Tabla B.3.3. Factor según el tipo de plano de separación requerido.	106
Tabla B.3.4. Número de horas a incrementar por la presencia de machos.	106
Tabla C.1.1. Materiales típicos para el moldeo por forjado con algunas de sus propiedades.	107
Tabla C.2.1. Líneas de partición de los moldes.	108
Tabla C.2.2. Factor de forma del material en función de la clase de forja.	108
Tabla C.2.3. Factor de complejidad del material en función de la clase de forja.	108
Tabla C.2.4. Número de operaciones requeridas en función de la clase de forja	109
Tabla C.2.5. Scale brake en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones	109
Tabla C.2.6. Blocker en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones	109
Tabla C.2.7. Semifinisher en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones	109

Tabla C.2.8. Finisher en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones	110
Tabla C.2.9. Bender en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones	110
Tabla C.2.10. Edger en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones	110
Tabla C.2.11. Fuller stage 1 en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones	110
Tabla C.2.12. Fuller stage 2 en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones	110
Tabla C.3.1. Estimación de tiempos para el corte de la rebaba.	111
Gráfico C.4.1 Coste por operación frente a la energía requerida para el forjado.	111

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Ilustración 1.1. Ejemplos de características de diseño que afectan al ensamblaje.	23
Ilustración 1.2. Guía de producibilidad engañosa para el diseño de piezas de chapa.	24
Ilustración 1.3. DFMA acorta el proceso de diseño. (De Plastics Design Forum, octubre de 1993.).	26
Ilustración 1.4. Los pasos típicos tomados en un estudio DFMA usando el software DFMA.	27
Ilustración 2.1. Estudio de los conocimientos de los diseñadores sobre los procesos de fabricación.	30
Ilustración 2.2. Encuesta sobre el conocimiento de los materiales poliméricos de los diseñadores.	31
Ilustración 2.3. Compatibilidad entre los procesos y los materiales.	33
Ilustración 2.4. Descripción general de la parte propuesta.	36
Ilustración 2.5. Clases de materiales compatibles con fundición a presión en cámara fría.	36
Ilustración 2.6. Procedimiento para procesar la selección de secuencia.	38
Ilustración 2.7. Siete categorías básicas de componentes de las máquinas.	39
Ilustración 2.8. Categoría 2 rotacional parcial con características secundarias.	40
Ilustración 2.9. Comparación de estimaciones de costes de mecanizado.	40
Ilustración 2.10. Vástago de conexión.	41
Ilustración 2.11. Costes de la biela para diferentes procesos y volúmenes de producción.	41
Ilustración 3.1. Torneado cilíndrico.	42
Ilustración 3.2. Operaciones del torno: a) cilindrado, b) tronzado, c) mandrinado, d) roscado exterior, e) refrentado.	43
Ilustración 3.3. Perforación de una prensa de perforación.	44
Ilustración 3.4. Fresado con una fresadora horizontal tipo rodilla.	44
Ilustración 3.5. Brochado en una máquina de broche vertical.	45
Ilustración 3.6. Formas típicas bases para el comienzo del moldeo mediante mecanizado.	47
Ilustración 4.1. Ciclo de moldeo por inyección.	51
Ilustración 4.2. Sistema de moldeo por inyección.	52
Ilustración 5.1. Dado de forja típica de martillos de múltiples impresiones.	60
Ilustración 5.2. Clasificación de forja, asignación del primer dígito.	61
Ilustración 5.3. Tabla que muestra la secuencia básica de operaciones requeridas en función del primer dígito de la clasificación del tipo de forja.	62
Ilustración 5.4. Asignación del segundo dígito para piezas compactas y planas.	62
Ilustración 5.5. Asignación del segundo dígito para las piezas largas.	62
Ilustración 5.6. Desglose de los costes medios de la forja en caliente.	64
Ilustración 5.7. Coste de operación relativo por operación.	66
Ilustración 6.1.1. Hoja de cálculo general de un programa.	71
Ilustración 6.1.2. Ejemplo de nota informativa al pinchar una celda de color rosado.	72

Ilustración 6.1.3. Ejemplo de botón “Selección de datos”.	72
Ilustración 6.1.4. Ejemplo de formulario.	73
Ilustración 6.1.5. Ejemplo de la advertencia de un formulario incompleto.	73
Ilustración 6.1.6. Ejemplo de botón que corre una macro.	74
Ilustración 6.1.7. Ejemplo de una celda que contiene el coste final de un determinado tipo de operación.	74
Ilustración 6.4.1. Botón “Clase (primera cifra)”.	77
Ilustración 7.2.1. Ejemplo formulario.	81
Ilustración 8.1.1. Geometría de la pieza deseada.	95
Ilustración 8.1.2. Cilindro macizo.	95
Ilustración 8.2.1. Coste del material y de la operación de torneado.	96
Ilustración 8.2.2. Coste de la operación de fresado.	96
Ilustración 8.3.1. Características seleccionadas para el cálculo de los costes adicionales.	97
Ilustración 8.4.1. Coste final de la pieza moldeada mediante forjado.	98

# 1. INTRODUCCIÓN AL DFMA.

## 1.1 ¿Qué es el Diseño para la Fabricación y el Montaje?

Se supone que "fabricar" se refiere a la fabricación de los componentes individuales de un producto y que "ensamblar" se refiere a la adición o unión de piezas para formar el producto terminado. Esto significa que, el ensamblaje no se considerará un proceso de fabricación en el mismo sentido que el mecanizado, el moldeo, etc. Por lo tanto, el término "diseño para la fabricación" (o DFM) significa el diseño para la facilidad de fabricación del conjunto de piezas que formarán el producto después del montaje y "diseño para el montaje" (o DFA) significa el diseño del producto para la facilidad de montaje. Así, el "diseño para la fabricación y el ensamblaje" (DFMA) es una combinación de DFA y DFM. DFMA se utiliza para tres actividades principales:

1. Como base para los estudios de ingeniería concurrentes para orientar al equipo de diseño en la simplificación de la estructura del producto, reducir los costos de fabricación y montaje y cuantificar las mejoras.
2. Como herramienta de comparación para estudiar los productos de los competidores y cuantificar las dificultades de fabricación y montaje.
3. Como una herramienta de costo debería ayudar a negociar los contratos de los proveedores.

El desarrollo del método DFA original se derivó de trabajos anteriores a la década de 1960 sobre el manejo automático. Se desarrolló un sistema de clasificación de tecnología de grupo para catalogar soluciones de manipulación automática para piezas pequeñas. Se hizo evidente que el sistema de clasificación también podría ayudar a los diseñadores a diseñar partes que serían fáciles de manejar automáticamente.

A mediados de los años setenta, la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (NSF) otorgó una subvención sustancial para extender este enfoque a las áreas generales de DFM y DFA. En esencia, esto significaba clasificar las características de diseño del producto que afectan significativamente los tiempos de ensamblaje y los costos de fabricación y cuantificar estos efectos. Al mismo tiempo, la Universidad de Salford en Inglaterra recibió una subvención del gobierno para estudiar el diseño del producto para el montaje automático. Como parte del estudio, se compararon varios diseños de medidores de flujo de gas domésticos. Estos medidores trabajaron todos en el mismo principio y tenían los mismos componentes básicos. Sin embargo, se encontró que su manufacturabilidad varió ampliamente y que el diseño menos manufacturable tenía seis veces el contenido de trabajo del mejor diseño.

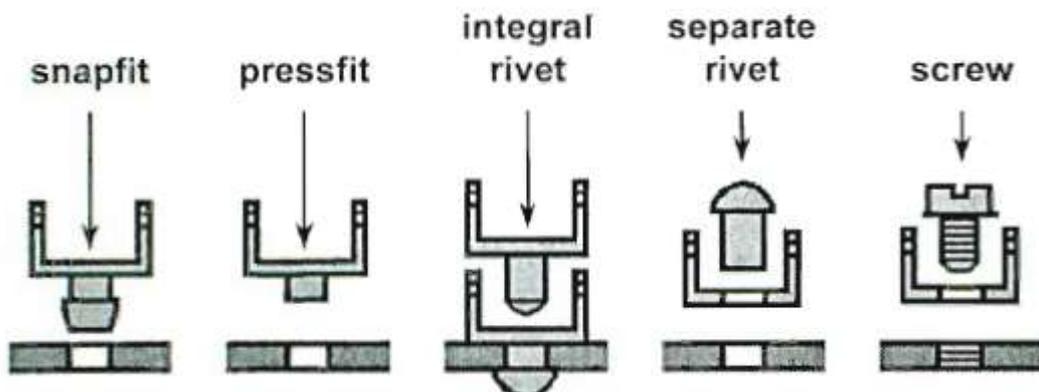


Ilustración. 1.1 Ejemplos de características de diseño que afectan al ensamblaje.

La ilustración 1.1 muestra cinco soluciones diferentes para el mismo problema de apego tomado de los medidores de flujo de gas estudiados. Puede observarse que, a la izquierda, el método más sencillo para fijar la carcasa consistió en un simple encaje a presión. En los ejemplos de la derecha, no sólo aumenta el tiempo de montaje, sino que aumenta el número y el costo de las piezas. Esto ilustra los dos principios básicos del diseño para facilitar el montaje de un producto: reducir el número de operaciones de montaje reduciendo el número de piezas y hacer las operaciones de montaje más fáciles de realizar.

Los estándares de tiempo de DFA para los pequeños productos mecánicos resultantes de la investigación apoyada por la NSF se publicaron por primera vez en forma de manual a finales de 1970 y los primeros éxitos resultantes de la aplicación de DFA en la industria se informaron en el artículo "Assembly Engineering". En el artículo, Sidney Liebson, director corporativo de fabricación de Xerox y partidario de la investigación durante mucho tiempo, sugirió que "DFA ahorraría a su compañía cientos de millones de dólares en los siguientes diez años". El artículo generó un intenso interés en la industria de Estados Unidos.

En ese momento, los microcomputadores estaban llegando al mercado. La versión de DFA, que se ejecuta en una computadora Apple II Plus, resultó atractiva para aquellos que deseaban obtener los beneficios reportados de las aplicaciones de DFA. Parece que, a diferencia de sus homólogos europeos o japoneses, los diseñadores estadounidenses prefirieron utilizar las nuevas computadoras en lugar de realizar cálculos manuales para analizar sus diseños y para facilitar su montaje.

Como resultado, los ingenieros de IBM Digital completaron el desarrollo de las versiones del software DFA para ejecutar sus propios productos.

Un gran avance en la implementación de DFA se hizo en 1988 cuando Ford Motor Company informó que el software DFA les había ayudado a ahorrar miles de millones de dólares en su línea de automóviles Taurus. Más tarde, se informó que General Motors (GM) hizo comparaciones entre su planta de ensamblaje en Fairfax, Kansas, que hizo el Pontiac Grand Prix, y la planta de ensamblaje de Ford para su Taurus y Mercury Sable modelos cerca de Atlanta. General Motors encontró una gran brecha de productividad y llegó a la conclusión de que el 41% de la brecha se podía atribuir a la escasa manufacturabilidad de los dos diseños. Por ejemplo, el coche Ford tenía menos partes en su parachoques delantero en comparación con en el GM Pontiac y las partes de Ford encajan más fácilmente.

En la década de 1960 se habló mucho sobre el diseño de productos para la facilidad de la fabricación. Se desarrollaron recomendaciones comúnmente conocidas como directrices de producibilidad. La ilustración 1.2 muestra una guía de diseño típica publicada en 1971 que enfatiza la simplificación de las partes individuales. Los autores de esta guía asumieron erróneamente que varias piezas de forma sencilla son intrínsecamente menos costosas de fabricar que una sola pieza compleja y que cualquier coste de montaje es más que compensado por el ahorro en costes de pieza. Se equivocaron en ambos aspectos, como muestran los resultados de la Tabla 1.1.

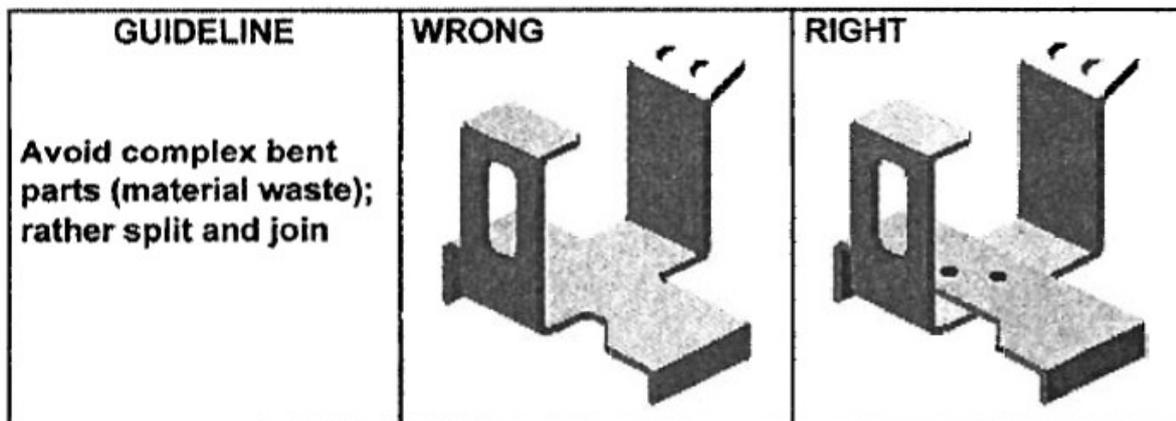


Ilustración 1.2 Guía de producibilidad engañosa para el diseño de piezas de chapa.

	Wrong	Right
<b>Setup</b>	<b>0.015</b>	<b>0.023</b>
<b>Process</b>	<b>0.535</b>	<b>0.683</b>
<b>Material</b>	<b>0.036</b>	<b>0.025</b>
<b>Piece part</b>	<b>0.586</b>	<b>0.731</b>
<b>Tooling</b>	<b>0.092</b>	<b>0.119</b>
<b>Total manufacture</b>	<b>0.678</b>	<b>0.850</b>
<b>Assembly</b>	<b>0.000</b>	<b>0.200</b>
<b>Total</b>	<b>0.678</b>	<b>1.050</b>

TABLA1.1 Costes estimados en dólares para los dos ejemplos de la Ilustración 1.2 si se fabrican 100.000 unidades.

Incluso ignorando los costes de montaje, las dos partes del diseño "correcto" son significativamente más caras que la pieza única en el diseño "incorrecto", incluso los costes de piezas (descuidando los costos de las herramientas) son más caros. Teniendo en cuenta los costes de montaje e ignorando los costes de almacenamiento, manipulación, calidad y papeleo, el diseño "correcto" es 50% más costoso que el diseño "incorrecto".

Una vez que los métodos para analizar las dificultades de montaje se desarrollaron en la década de 1970, se reconoció que había un conflicto entre la producibilidad y el montaje. Se encontró que la simplificación de los productos mediante la reducción del número de partes separadas a través de DFA, del orden del 50% en promedio, podría fácilmente lograr reducciones sustanciales de los costes de manera segura. Mucho más importante, sin embargo, fue el hecho de que se podría lograr un mayor ahorro en el costo de las piezas. La capacidad de estimar tanto el montaje como los costes de fabricación de piezas en las primeras etapas del diseño del producto es la esencia del DFMA. El ejemplo simple de la ilustración. 1.2 y la Tabla 1.1 ilustra que si el diseño "correcto" estuviera sujeto a un análisis de DFA, se pondría a prueba al diseñador por qué el subconjunto no podía ser fabricado como una sola pieza eliminando así un coste de ensamblaje de 0.20\$. Un análisis adicional mostraría un ahorro adicional de 0.17\$ en costes de la pieza. Que los diseñadores deben prestar más atención a los posibles problemas de fabricación se ha defendido durante muchos años. Tradicionalmente, se esperaba que los estudiantes de ingeniería tomaran cursos de "talleres" además de cursos de diseño de máquinas. La idea era que un diseñador competente debería estar familiarizado con los procesos de fabricación para evitar añadir innecesariamente coste de fabricación durante el diseño.

Desafortunadamente, en los años sesenta los cursos de taller desaparecieron de los programas universitarios en los Estados Unidos; No fueron considerados aptos para el crédito académico por la nueva generación de teóricos de la ingeniería. De hecho, una carrera en diseño no se consideraba generalmente apropiada para uno con un grado de ingeniería. Por supuesto, la palabra "diseño" tiene muchos significados diferentes. Para algunos, significa el diseño estético de un producto, por otro lado, el diseño puede significar establecer los parámetros básicos de un sistema. Por ejemplo, antes de considerar cualquier detalle, el diseño de una planta de energía podría significar establecer las características de las diversas unidades, tales como generadores, bombas, calderas, tuberías de conexión, etc.

Otra interpretación de la palabra "diseño" sería el detalle de los materiales, las formas y la tolerancia de las partes individuales de un producto. Es una actividad que comienza con bocetos de partes y ensamblajes; A continuación, progresa a la estación de trabajo CAD, donde se producen dibujos de piezas detalladas y planos de montaje. Estos dibujos se pasan entonces a los ingenieros de fabricación y ensamblaje, cuyo trabajo es optimizar los procesos utilizados para producir el producto final. Con frecuencia, es en esta etapa se encuentran problemas de fabricación y montaje y se hacen solicitudes para cambios de diseño. A veces estos cambios de diseño son grandes en número y conllevan retrasos considerables en la liberación del producto final. Además, cuanto más tarde se produzcan los cambios en el ciclo de diseño y desarrollo, más costosos serán. Por lo tanto, no sólo es importante tener en cuenta la fabricación y el montaje durante el diseño del producto, sino que también estas consideraciones deben ocurrir tan pronto como sea posible en el ciclo de diseño.

Esto se ilustra de forma cualitativa por el gráfico de la ilustración 1.3, mostrando que el tiempo extra que se gasta en el proceso de diseño es más que compensado por el ahorro de tiempo en el momento en que se realiza el prototipo. Así, además de reducir los costos del producto, la aplicación del diseño para la fabricación y el montaje (DFMA) acorta el tiempo para poner el producto al mercado. Como ejemplo, Ingersoll-Rand Company informó que el uso del software DFMA de Boothroyd Dewhurst, Inc., redujo el tiempo de desarrollo del producto de dos años a uno. Además, el equipo de ingeniería simultánea redujo el número de piezas en un radiador de compresor portátil y un conjunto de enfriador de aceite de 80 a 29, disminuyó el número de sujeciones de 38 a 20, redujo el número de operaciones de montaje de 159 a 40 y redujo el tiempo de ensamblaje de 18,5 a 6,5 min. Desarrollado el nuevo diseño en junio de 1989, entró en plena producción en febrero de 1990.

Otra razón por la que una consideración en el ciclo de diseño de la fabricación y el ensamblaje debe considerarse lo antes posible es porque ahora se acepta ampliamente que más del 70% de los costos finales del producto se determinan durante el diseño.

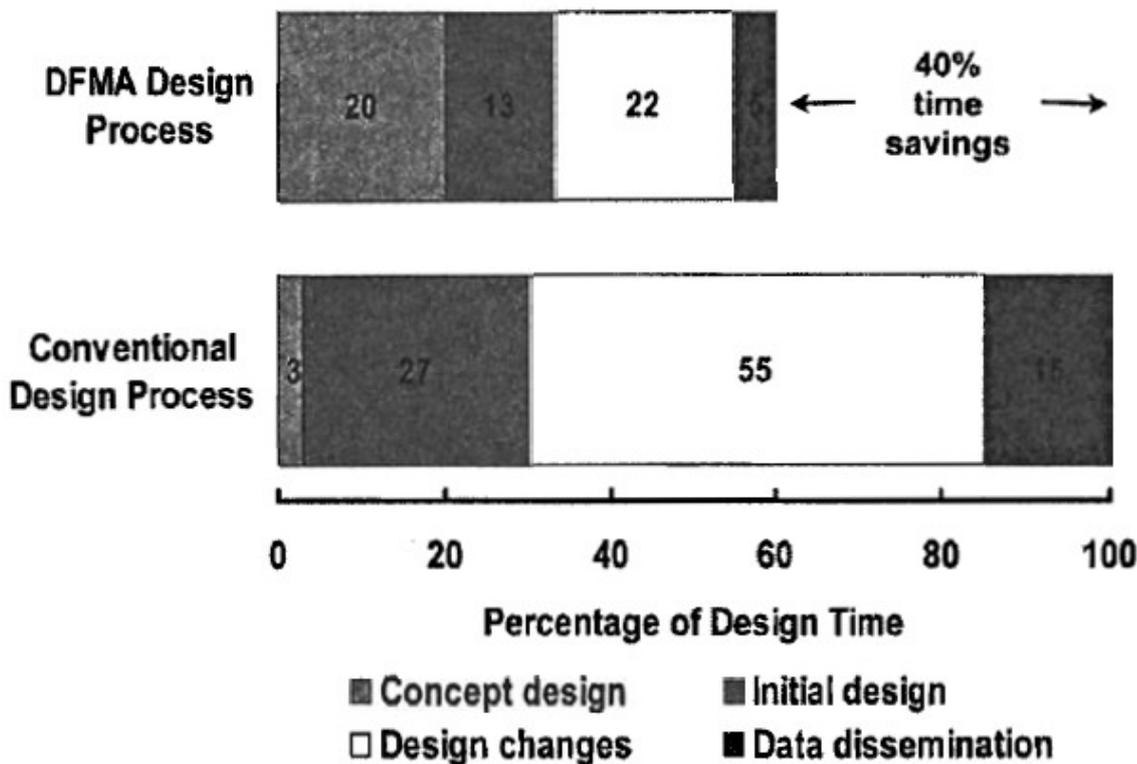


Ilustración 1.3. DFMA acorta el proceso de diseño. (De Plastics Design Forum, octubre de 1993.)

Tradicionalmente, la actitud de los diseñadores ha sido "diseñar, construir". El diseñador lanza los diseños a los ingenieros de fabricación, que luego tienen que lidiar con los fabricantes los distintos problemas derivados que no se tuvieron en cuenta en la fase de diseño. Un medio para superar este problema es consultar a los ingenieros de fabricación en la fase de diseño. El resultante del trabajo en equipo evita muchos problemas. Sin embargo, estos equipos, ahora llamados ingeniería simultánea o equipos de ingeniería concurrentes, requieren herramientas de análisis para ayudarles a estudiar los diseños propuestos y evaluarlos desde el punto de vista de la dificultad de fabricación y los costos.

## 1.2 ¿Cómo Funciona DFMA?

Cuando se empezó a tomar en serio la DFA a principios de los años ochenta y se apreciaron los consiguientes beneficios, se hizo evidente que las mejoras más importantes surgían de la simplificación del producto, reduciendo el número de partes separadas. Con el fin de orientar al diseñador en la reducción de partes, la

metodología DFA proporciona tres criterios contra los cuales cada parte debe ser examinada a medida que se añade al producto durante el montaje.

1. Durante el funcionamiento del producto, la pieza se desplaza en relación con todas las demás piezas ya ensambladas.
2. ¿Debe la pieza ser de un material diferente o estar aislada de todas las demás piezas ya montadas? Sólo son aceptables las razones fundamentales relativas a las propiedades del material.
3. La pieza debe estar separada de todas las demás piezas ya montadas, ya que de otro modo sería imposible el montaje o desmontaje de otras piezas separadas.

El hecho de poder reducir el número de partes que forman una pieza, lleva a un número de piezas mínimo necesario para satisfacer los requisitos del diseño del producto sin tener en cuenta limitaciones prácticas.

Es necesario que el diseñador o el equipo de diseño justifiquen la existencia de aquellas partes que no cumplen los criterios. La justificación puede derivarse de consideraciones prácticas o técnicas o de consideraciones económicas.

Es necesario tener estimaciones de los tiempos y costes de montaje, para que cualquier posible ahorro pueda ser tenido en cuenta al considerar alternativas de diseño. Es posible hacer estimaciones de los costes de montaje, y posteriormente estimar el coste de las piezas y herramientas asociadas, sin tener dibujos con detalles finales de la pieza final.

El segundo paso en un análisis es el diseño para la fabricación (DFM). Esto significa estimar el costo de las piezas fabricadas con el fin de cuantificar los efectos de cualquier mejora de diseño sugerida por el diseño inicial para el análisis del ensamblaje (DFA). Se da el caso típico de que aunque DFA significa diseño para el ensamblaje, los resultados de mejorar en el ensamblaje se manifiestan usualmente en reducciones significativas en los costes de fabricación parcial.

La ilustración 1.4., resume las medidas tomadas al usar DFMA durante el diseño. El análisis de DFA se conduce primero conduciendo a una simplificación de la estructura del producto. Luego, usando DFM, se obtienen estimaciones previas de costes para las partes tanto para el diseño original como para el nuevo diseño, para tomar decisiones de compensación. Durante este proceso se consideran los mejores materiales y procesos a utilizar para las distintas partes. Una vez que se ha realizado la selección final de materiales y procesos, se puede realizar un análisis más profundo de DFM para el diseño detallado de piezas.

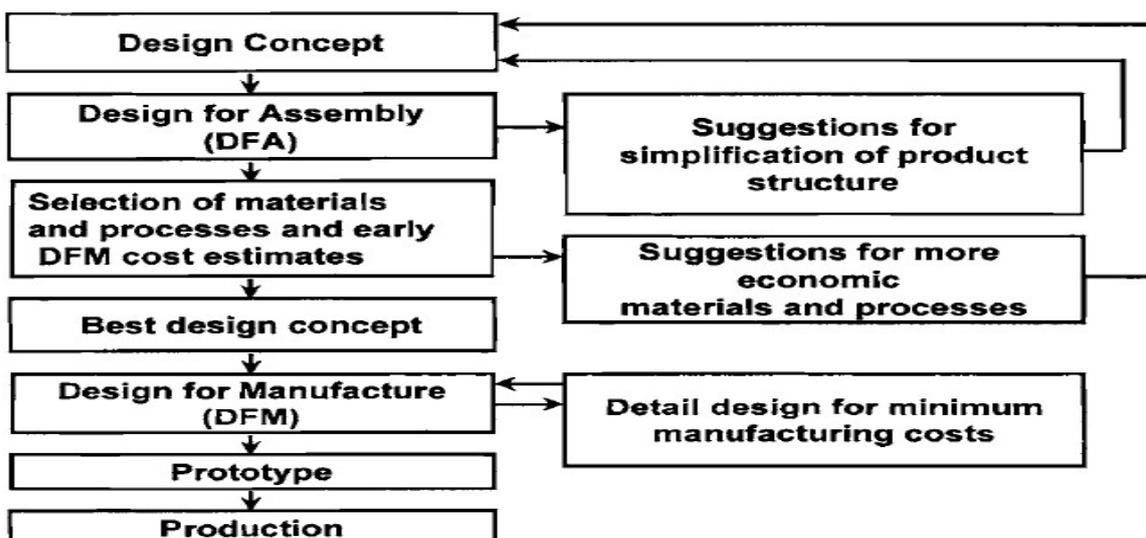


Ilustración 1.4. Los pasos típicos tomados en un estudio DFMA usando el software DFMA.

### 1.3 Razones para No Implementar DFMA.

#### **No hay tiempo.**

Diseñadores limitados por la necesidad urgente de incorporar el tiempo de diseño a la fabricación para un nuevo producto.

#### **No se ha inventado aquí.**

Se puede encontrar una enorme resistencia cuando se proponen nuevas técnicas a los diseñadores. Sólo si admiten DFMA, se aplicará con éxito.

#### **El síndrome del bebé feo.**

Cuando un grupo externo o un grupo separado dentro de la empresa se comprometen a analizar diseños actuales para facilidad de fabricación y montaje, comúnmente se encontrará que se podrían hacer mejoras significativas al diseño actual, y cuando estas mejoras son llevadas a la atención de los que produjeron el diseño esto puede dar lugar a una resistencia extrema. Diciendo a un diseñador que sus diseños podrían mejorarse es como decirle a una madre que su bebé es feo. Es importante, por lo tanto, involucrar a los diseñadores en el análisis y proporcionarles un incentivo para producir mejores diseños. Si realizan el análisis, es menos probable que tomen como crítica cualquier problema que pueda ser destacado.

#### **Bajos costes de montaje.**

Como el primer paso es un análisis DFA del producto o subconjunto, es muy frecuentemente pensar que, dado que los costos de ensamblaje para un producto en particular representan sólo una pequeña proporción de los costos totales de fabricación, no tiene sentido realizar un análisis de DFA.

#### **Volumen bajo.**

A menudo se expresa la opinión de que DFMA sólo vale la pena cuando el producto se fabrica en grandes cantidades. Se podría argumentar, sin embargo, que el uso de la filosofía DFMA es aún más importante cuando las cantidades de producción son pequeñas. Esto se debe a que, comúnmente, la reconsideración de un diseño inicial normalmente no se lleva a cabo para una producción de bajo volumen. Aplicar la filosofía "hacerlo bien la primera vez" se vuelve aún más importante, cuando las cantidades de producción son pequeñas.

#### **La base de datos no se aplica a nuestros productos.**

Debido a que DFMA debe ser aplicado en la primera etapa de diseño, antes de que el diseño detallado haya tenido lugar, existe la necesidad de una base de datos generalizada para este propósito. Más tarde, cuando se desean estimaciones más precisas, entonces el usuario puede emplear una base de datos personalizada si es necesario.

#### **Es sólo análisis de valor.**

DFMA tiene la ventaja de que es un procedimiento paso a paso sistemático que se puede aplicar en todas las etapas del diseño y que desafía al diseñador o equipo de diseño para justificar la existencia de todas las partes y considerar diseños alternativos. La experiencia ha demostrado que DFMA todavía hace mejoras significativas de los productos existentes incluso después de que el análisis de valor se ha llevado a cabo.

#### **DFMA es sólo una entre muchas técnicas.**

Desde la introducción del DFMA, se han propuesto muchas otras técnicas, como el diseño para la calidad (DFQ), el diseño para la competitividad (DFC), el diseño para la confiabilidad y muchos más.

#### **DFMA conduce a productos que son más difíciles de mantener.**

Esto es absurdo, la experiencia demuestra que un producto que es fácil de montar es generalmente más fácil de desmontar y volver a montar. De hecho, los productos que necesitan un servicio continuo que implica la retirada de cubiertas de inspección y el reemplazo de varios artículos deben tener DFMA aplicado aún más rigurosamente durante la etapa de diseño.

#### **Yo prefiero reglas de diseño.**

Hay un peligro en el uso de reglas de diseño porque pueden guiar al diseñador en la dirección equivocada. Generalmente, las reglas intentan obligar al diseñador a pensar en piezas simplificadas que son fáciles de

fabricar. Además, al considerar diseños novedosos de partes que realizan varias funciones, el diseñador necesita saber qué penalidades se asocian cuando no se siguen los métodos. Por estas razones, los procedimientos sistemáticos utilizados en DFMA que guían al diseñador hacia estructuras de producto más simples y proporcionan datos cuantitativos sobre el efecto de cualquier cambio o sugerencia de diseño, se encuentran como el mejor enfoque.

## **1.4 ¿Cuáles son las Ventajas de Aplicar DFMA Durante el Diseño del Producto?**

Parece que la reducción en el coste de fabricación del producto, no es necesariamente considerada como el resultado más deseado de los esfuerzos de rediseño, si no que la reducción del tiempo de comercialización y la mejora de la calidad son más importantes que la reducción de los costes.

Otra ventaja es que DFMA proporciona un procedimiento sistemático, para analizar un diseño propuesto desde el punto de vista del montaje y la fabricación.

Este procedimiento resulta en productos más pequeños que son menos costosos de montar y fabricar. Además, cualquier reducción en el número de piezas en un ensamblaje produce una reducción de costes debido a los dibujos y especificaciones que ya no son necesarios, los vendedores que ya no son necesarios y el inventario que se elimina. Todos estos factores tienen un efecto importante en los gastos generales, que en muchos casos constituyen la mayor proporción del coste total del producto.

Las herramientas DFMA fomentan el trabajo en equipo y se pueden lograr los beneficios de la ingeniería simultánea o concurrente.

## **1.5 Conclusiones.**

El uso de software DFMA tiene un impacto tremendo cuando se aplica correctamente en un entorno de ingeniería concurrente. Lamentablemente, los pequeños fabricantes no han podido aprovechar el enorme potencial de DFMA; No tienen la mano de obra ni la experiencia necesaria. Incluso con las grandes empresas, los éxitos probados en una división no necesariamente se extienden a otras divisiones sin el apoyo de la administración.

A pesar de todas las historias de éxito, la principal barrera para la implementación del DFMA continúa siendo la naturaleza humana. La gente se resiste a nuevas ideas y herramientas desconocidas, o afirma que siempre han tenido en cuenta la fabricación durante el diseño. La metodología DFMA desafía la jerarquía de diseño de productos convencional.

En conclusión, parece que para seguir siendo competitivos en el futuro, casi todas las organizaciones manufactureras tendrán que adoptar la filosofía DFMA y aplicar herramientas de cuantificación de costes en las primeras etapas del diseño del producto.

## 2. SELECCIÓN DE MATERIALES Y PROCESOS.

### 1.1. Introducción.

Una parte del diseño para la fabricación es la selección sistemática de materiales y combinaciones de procesos para la fabricación de piezas, que luego pueden clasificarse de acuerdo con diversos criterios.

Se pueden perder oportunidades de grandes mejoras en la fabricación a través de selecciones tan limitadas de procesos de fabricación y los materiales asociados en las primeras etapas del diseño del producto, debido a la poca información que tiene los diseñadores sobre los diferentes procesos de fabricación y materiales. En la ilustración 2.1 y en la ilustración 2.2 se muestran los resultados de una encuesta, en la que se le preguntaba a los diseñadores por diversos tipos de procesos y materiales, y en ella se ve claramente que el conocimiento de éstos sobre ambas cosas era muy escaso. Esto muestra nuevamente una sorprendente falta de familiaridad con algunos procesos y materiales utilizados conjuntamente. Esto conlleva a que generalmente los diseñadores eligen combinaciones de materiales y procesos con los que están familiarizados, dejando pasar muchas posibilidades de utilizar otros procesos que pueden ser mucho más eficaces en función de los costes.

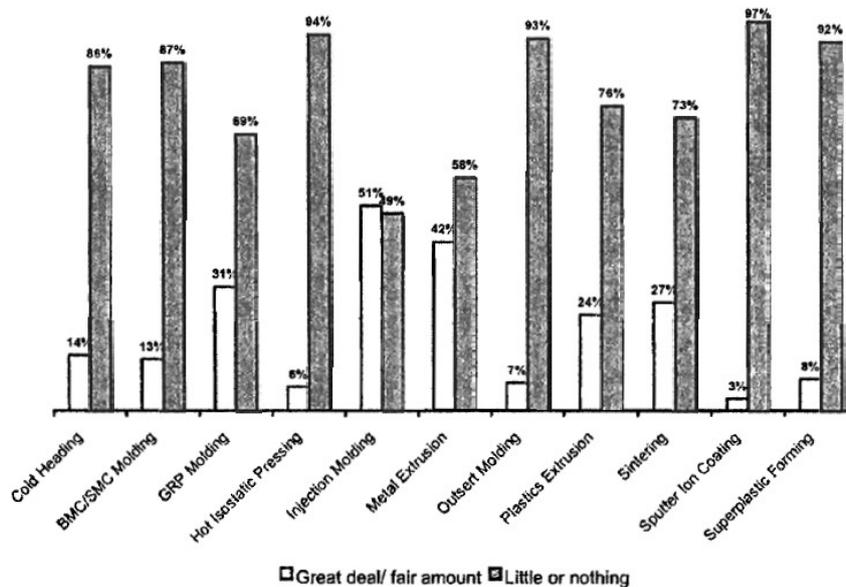


Ilustración 2.1 Estudio de los conocimientos de los diseñadores sobre los procesos de fabricación.

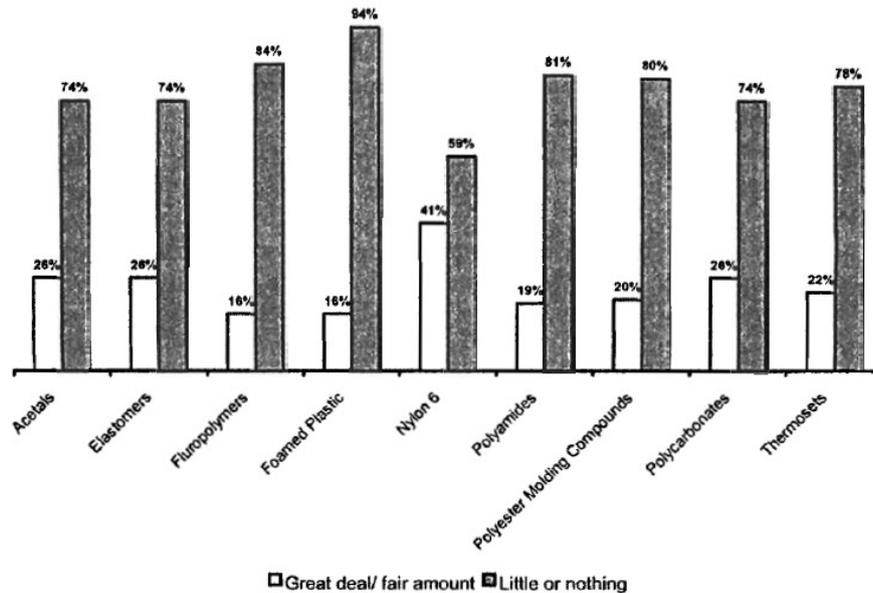


Ilustración 2.2 Encuesta sobre el conocimiento de los materiales poliméricos de los diseñadores.

## 2.2. Requisitos Generales para la Selección Anticipada de Materiales y Procesos.

Con el fin de ser de verdadero valor de diseño, la información sobre la cual se va a basar la selección inicial de combinaciones de materiales / procesos y su clasificación debe estar disponible en la etapa inicial de diseño conceptual de un nuevo producto. Dicha información podría incluir, por ejemplo:

- Ciclo de vida del producto.
- Niveles admisibles de gastos en herramientas.
- Posibles categorías de formas y niveles de complejidad.
- Requisitos del servicio o del medio ambiente.
- Factores de apariencia.
- Factores de precisión.

Es importante darse cuenta de que para muchos procesos el producto y el proceso están tan íntimamente relacionados, que el diseño del producto no debe utilizar un proceso anticipado como punto de partida. En otras palabras, muchos detalles de diseño de una pieza no pueden definirse sin una consideración de procesamiento. Por esta razón, es crucial que se realice una evaluación económica de los procesos competidores mientras el producto se encuentra todavía en la etapa conceptual. Esta evaluación temprana garantizará que todos los procesos económicamente viables, se investiguen antes de que el diseño del producto evolucione a un nivel en el que se convierta en un proceso específico.

A medida que un diseño avanza desde la etapa conceptual hasta la producción, se pueden utilizar diferentes métodos para realizar el modelado de costes del producto. En la etapa conceptual, las comparaciones aproximadas de los costes, de productos de tamaño y complejidad similares, pueden ser suficientes. Si bien este procedimiento contiene cierto grado de incertidumbre, sólo requiere información de diseño conceptual y se utiliza para una primera comparación económica. A medida que avanza el diseño y se seleccionan materiales y procesos específicos, pueden emplearse métodos de modelado de costes más avanzados. Estos pueden ser particularmente útiles para establecer la relación entre las características de diseño y los costes de fabricación para el proceso elegido.

## 2.3 Selección de Procesos de Fabricación.

La selección de procesos apropiados para la fabricación de una parte en concreto se basa en una coincidencia de los atributos requeridos de la pieza y las diversas capacidades de proceso. Una vez que se determina la función general de una parte, se puede formular una lista que da las características geométricas esenciales, las propiedades del material y otros atributos que se requieren.

La mayoría de las partes componentes no se producen por un solo proceso, sino que requieren una secuencia de procesos diferentes para lograr todos los atributos requeridos de la parte final. Esto es particularmente el caso cuando se usan procedimientos de conformado como proceso inicial y, a continuación, se requiere procesos de eliminación y acabado de material para producir parte o la totalidad de las características finales de las piezas. Se utilizan combinaciones de muchos procesos, y esto es necesario porque un único proceso no puede proporcionar en general todos los atributos de la parte terminada. Sin embargo, uno de los objetivos del análisis DFMA es la simplificación de la estructura del producto y la consolidación de las piezas.

Hay cientos de procesos y miles de materiales. Además, se están desarrollando continuamente nuevos procesos y materiales. Afortunadamente, las siguientes observaciones ayudan a simplificar el problema general de selección:

1. No son posibles muchas combinaciones de procesos y materiales. La ilustración 2.3 muestra una matriz de compatibilidad para un rango seleccionado de procesos y tipos de materiales.
2. No son posibles muchas combinaciones de procesos y, por lo tanto, no aparecen en ninguna secuencia de procesamiento.
3. Algunos procesos afectan sólo un atributo de la pieza, particularmente el tratamiento superficial y los procesos de tratamiento térmico.
4. Las secuencias de procesos tienen un orden natural de generación de forma, seguido por adición o refinamiento de características por eliminación de material, y luego mejora de propiedades materiales.

	Cast Iron	Carbon Steel	Alloy Steel	Stainless Steel	Aluminum and Alloys	Copper and Alloys	Zinc and Alloys	Magnesium and Alloys	Titanium and Alloys	Nickel and Alloys	Refractory Metals	Thermoplastics	Thermosets	
Sand Casting														Solidification Processes
Investment Casting														
Die Casting														
Injection Molding														
Structural Foam Molding														
Blow Molding(ext.)														
Blow Molding(Inj.)														
Rotational Molding														
Impact Extrusion														Bulk Deformation Processes
Cold Heading														
Closed Die Forging														
Powder Metal Processing														
Hot Extrusion														
Rotary Swaging														
Machining (from stock)														Material Removal Processes
ECM														
EDM														
Wire EDM														Profiling
Sheet Metal(stamp/bend)														Sheet Forming Processes
Thermoforming														
Metal Spinning														

<input type="checkbox"/>	Normal Practice	<input type="checkbox"/>	Not Applicable
<input type="checkbox"/>	Less common		

Ilustración 2.3 Compatibilidad entre los procesos y los materiales.

Los procesos se pueden categorizar como:

- Procesos primarios.
- Procesos primarios / secundarios.
- Procesos terciarios.

Se puede hacer referencia a procesos primarios como los que se usan para producir las materias primas para la fabricación, tales como el laminado plano, el hundimiento y el alambrado.

En este caso de la producción de partes, el término proceso primario se referirá al proceso principal de generación de formas. El moldeo, la forja y el moldeo por inyección son ejemplos de procesos primarios generadores de formas.

Los procesos primarios y primarios / secundarios, por otra parte, pueden generar la forma principal de la pieza, formar características en la pieza, o refinar las características de la pieza. Estos procesos aparecen al principio o después en una secuencia de procesos. Esta categoría incluye procesos tales como mecanizado, rectificado y brochado.

Los procesos terciarios no afectan a la geometría de la pieza y siempre aparecen después de los procesos primarios y primarios / secundarios. Esta categoría consiste en procesos de acabado como tratamientos de superficies y tratamientos térmicos. La selección de los procesos terciarios se simplifica, porque muchos procesos terciarios sólo afectan a un solo atributo de la parte. Por ejemplo, se utiliza el recubrimiento a menudo para mejorar la apariencia o la resistencia a la corrosión.

## 2.4. Capacidades de Proceso.

Cada proceso puede ser analizado para determinar el rango de sus capacidades en términos de atributos de las partes que se pueden producir. En estas capacidades se incluyen características de forma que se pueden producir, rangos de tolerancia naturales, capacidades de rugosidad de la superficie, etc. Estas capacidades demuestran si un proceso puede usarse para producir los atributos de parte correspondientes.

Atributos generales de forma:

-*Depresiones (Depress)*: La capacidad de formar rebajes o ranuras en las superficies de la pieza.

-*Pared uniforme (UniWall)*: Espesor de la pared Uniforme.

-*Sección transversal uniforme (UniSect)*.

-*Eje de rotación (AxisRot)*: Piezas cuya forma puede ser generada por rotación alrededor de un solo eje: un sólido de revolución.

-*Sección transversal regular (RegXSec)*: Las secciones perpendiculares al eje de la pieza contienen un patrón. Los cambios en la forma que mantienen un patrón regular son permisibles.

-*Cavidades capturadas (CaptCav)*: Capacidad para formar cavidades con superficies reentrantes (por ejemplo, una botella).

-*Cerradas (Enclosed)*: Partes que son huecas y completamente cerradas.

-*Superficies libres de borrado (NoDraft)*: La capacidad de producir secciones transversales constantes en la dirección del movimiento de la herramienta.

-*Consolidación de piezas (PConsol)*: La capacidad de incorporar varios requisitos funcionales en una sola pieza, eliminando la necesidad de ensamblajes multipartes.

-*Características de la alineación (Alignmt)*: La facilidad de incorporar en la parte de alineación positiva o características de ubicación que ayudará en el montaje de piezas de acoplamiento.

-*Cierres integrales (IntFast)*: La rentabilidad y el alcance de los elementos de fijación que se pueden diseñar en la pieza.

## 2.5. Selección de Materiales.

Se ha prestado considerable atención a la selección sistemática de materiales específicos para satisfacer las propiedades requeridas. Los sistemas de software basado en bases de datos completas de las propiedades del material son de gran ayuda. Si bien estos procedimientos son una valiosa contribución a la selección sistemática

de materiales, su utilidad en las primeras etapas del diseño del producto, cuando se toman decisiones iniciales sobre materiales y procesos, está restringida por varias razones, entre ellas:

1. Estos procedimientos están dirigidos a la selección de materiales específicos basados en especificaciones detalladas de propiedades materiales, que pueden no estar disponibles a principios del proceso de diseño. En esta etapa sólo se han decidido rangos generales de propiedades.
2. La selección del material se considera independiente de los procesos de fabricación que se pueden utilizar, mientras que la compatibilidad entre los procesos y los materiales es importante.

### **Agrupación de materiales en clases compatibles de proceso.**

En lugar de utilizar una sola base de datos de materiales completos, es preferible dividir las bases de datos de materiales en clases relacionadas con los principales procesos generadores de forma utilizados en la fabricación de piezas. Esto es necesario debido a la incompatibilidad entre algunos procesos y materiales y porque, en general, la selección de procesos y materiales debe ser considerada en conjunto.

## **2.6 Selección Primaria de Procesos/Materiales.**

Se pueden desarrollar procedimientos sistemáticos para la selección de combinaciones primarias de procesos / materiales. Estos procedimientos operan eliminando procesos y materiales a medida que se produce una especificación más detallada de los atributos de la pieza requerida. Si se especificarán como atributos de forma requeridos para una parte, los siguientes:

- |                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 1. Depresiones.                  | Sí |
| 2. Muro uniforme.                | Sí |
| 3. Sección transversal uniforme. | Sí |
| 4. Eje de rotación.              | No |
| 5. Sección transversal regular.  | No |
| 6. Captura de cavidad.           | No |
| 7. Cavidad cerrada.              | No |

Requerimientos materiales.

A. Temperatura máxima de 500 ° C.

B. Excelente resistencia a la corrosión a ácidos y álcalis débiles.

En esta lista, los atributos de forma con un "Sí" eliminarán aquellos procesos que no son capaces de producir estas características. Las características con un "No" eliminará aquellos procesos que sólo son capaces de producir partes con estas características.

## **2.7 Selección Sistemática de Procesos y Materiales.**

El desarrollo de procedimientos basados en computadoras para la selección de procesos y materiales en los atributos generales de las partes puede tener un impacto significativo en el diseño temprano del producto, y se han hecho varios enfoques a este problema.

### 2.7.1 Selección Primaria de Procesos / Materiales.

Se han creado programas en los cuales definiendo el tipo de pieza, las dimensiones totales, y seleccionando un proceso se indican que materiales son compatibles, cuales incompatibles y que con que otros materiales son compatibles.

En estos programas se indican todas las combinaciones de procesos y materiales que no son adecuadas, o para las cuales la geometría de la pieza puede estar fuera de los límites de procesamiento normales.

Por ejemplo, para una parte estructural, la resistencia a la deformación será claramente un requisito importante. Sin embargo, el valor límite de elasticidad admisible mínimo dependerá del grosor de la pared de la pieza, que a su vez dependerá de la combinación de proceso / material a utilizar.

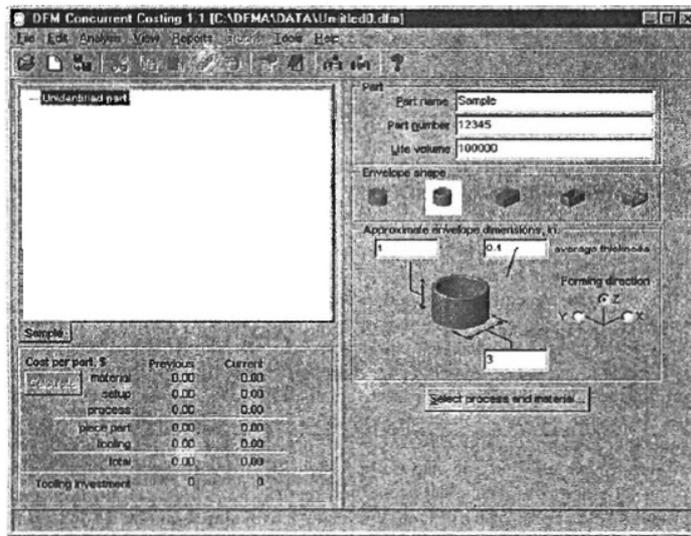


Ilustración 2.4 Descripción general de la parte propuesta.

La ilustración 2.4 se muestra una descripción de la parte inicial donde se definen el tipo de pieza general y las dimensiones totales, incluyendo el grosor de la pared. Después de esto, se debe seleccionar un proceso como se indica en la ilustración. 2.5, y luego se indican los materiales compatibles en diferentes colores,(rojo para incompatible, verde para compatible y amarillo para materiales compatibles, pero superando un límite de procesamiento normal). En el caso de la ilustración. 2.5, se ha seleccionado la fundición a presión en cámara fría y los procesos compatibles indicados son aleaciones de cobre, magnesio, aluminio y cinc.

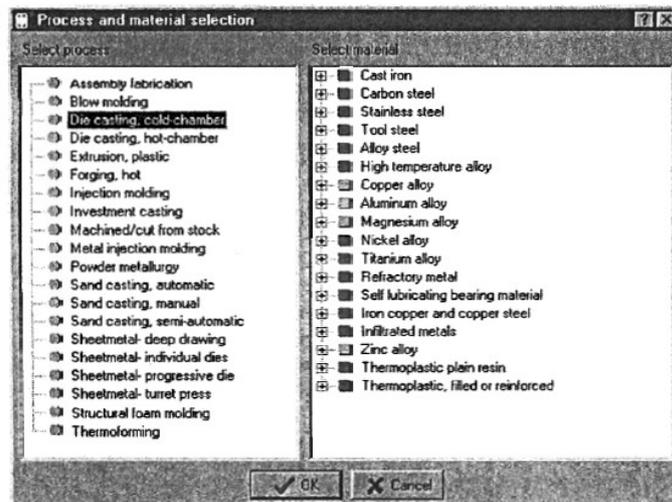


Ilustración 2.5 Clases de materiales compatibles con fundición a presión en cámara fría.

## 2.7.2 Selector de Secuencia de Procesos Experto.

El hecho de que se seleccione una combinación de proceso/material apropiada sin considerar secuencias viables de operaciones, puede conducir a la omisión de algunas combinaciones apropiadas de procesos y materiales. Se ha investigado un experto generador de secuencia de procesamiento para mejorar este aspecto de la selección de materiales y procesos.

Con este procedimiento, el usuario clasifica la geometría y especifica las restricciones de material para la pieza. El resultado es una lista de secuencias viables de procesos y materiales compatibles. El procedimiento se divide en cuatro pasos: entrada de geometría, selección de proceso, selección de material y actualización del sistema. La geometría de la pieza se clasifica primero según su tamaño, forma, sección transversal y características. Utilizando reglas de concordancia de patrones, se seleccionan los procesos que forman la geometría de la pieza. La selección de materiales utiliza materiales de teoría de conjuntos, como se describió anteriormente.

La clasificación geométrica de una parte se refiere a las siguientes características:

1. El tamaño total.
2. La forma básica.
3. La precisión y el acabado superficial.
4. La sección transversal.
5. Características funcionales: proyecciones, depresiones, etc.

Como se describió anteriormente, los procesos se clasifican como primarios y primarios/ secundarios o terciarios para aprovechar el orden natural de los procesos en una secuencia. Las reglas, formuladas a partir del conocimiento sobre procesos y materiales, se utilizan para seleccionar secuencias de procesos y materiales para la fabricación de piezas.

Los procesos se seleccionan utilizando un sistema de prueba de coincidencia de patrones y reglas del formulario. Si. . .

(Condición 1)

(Condición 2)

(Condición 3)

Entonces. . .

(Acción 1)

Para la selección del proceso primitivo, las condiciones son restricciones sobre el tamaño de la envolvente, la forma, y la descripción transversal de la pieza. La acción es la selección de un candidato proceso primario. Si una parte satisface las restricciones, entonces el proceso se elige como un proceso primario candidato. Otras reglas de la misma forma entonces evalúan qué características de la parte pueden ser formadas por el proceso primitivo. Las condiciones para estas reglas son restricciones en los descriptores de las características y la acción es concluir que el proceso primario puede formar la característica.

Las reglas de selección de proceso están mejor combinadas con funciones de pertenencia a la lógica difusa para modelar la transición progresiva de "fácil" a "difícil o imposible" de fabricar por el proceso seleccionado.

A continuación, se busca la base de datos de material para el proceso primitivo seleccionado y se utiliza el enfoque de lógica difusa descrito anteriormente para elegir los materiales candidatos.

Dado que las propiedades de un material están relacionadas con la forma en que se procesa el material, cada proceso tiene su propia base de datos de materiales. Los materiales se seleccionan asignando la entrada del usuario a las propiedades del material. Las propiedades materiales que pueden verse afectadas por los procesos de fabricación terciaria no se utilizan para excluir los materiales de la consideración, en esta etapa. Por ejemplo, la resistencia a la corrosión podría conseguirse recubriendo un material que de otro modo sería inaceptable.

Los procesos primarios y primarios / secundarios se seleccionan de manera similar para formar cualquier características de la parte que no pueden ser formadas por el proceso primario. De manera similar, los procesos

terciarios se seleccionan para satisfacer los requisitos materiales que el material candidato no podría cumplir. Una secuencia viable de procesos se encuentra cuando todos los objetivos geométricos y materiales especificados por el usuario están satisfechos. La ilustración 2.6, muestra este proceso gráficamente. Aquí los círculos representan las metas y los procesos. Los objetivos satisfechos se indican mediante círculos rellenos con flechas que apuntan al material o proceso que satisface la meta.

Si no se puede encontrar un proceso o material adecuado para formar las características requeridas o satisfacer los requisitos de material, entonces el procedimiento retrocede para resolver el impase.

Por ejemplo, si no se puede encontrar un material adecuado, entonces el procedimiento retrocede para elegir otro proceso primario. De manera similar, si un proceso terciario no puede ser encontrado para satisfacer un requisito material, entonces el procedimiento retrocede para elegir un material alternativo.

Una característica de este enfoque para la selección de material y proceso es que a medida que crece la lista de atributos de la parte que se van a cumplir, el número de secuencias posibles también puede aumentar. Esto difiere del procedimiento para seleccionar combinaciones primarias de proceso / material, en que la lista de posibles combinaciones generalmente disminuye, a medida que la especificación de la parte se vuelve más precisa. Por ejemplo, la adición de una tolerancia de acabado superficial a la lista de atributos introducirá procesos secundarios en secuencias que podrían producir este requisito.

Por esta razón es importante que se considere la clasificación económica de las secuencias de procesamiento generadas.

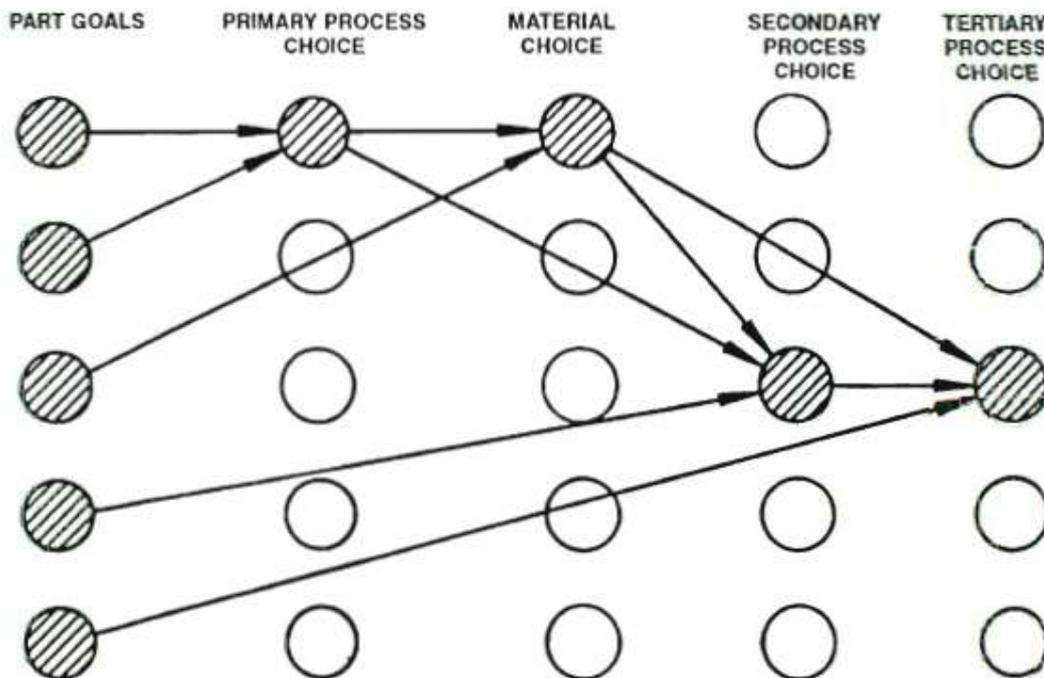


Ilustración 2.6. Procedimiento para procesar la selección de secuencia.

### 2.7.3 Clasificación Económica de Procesos.

Las combinaciones de material / proceso viables determinadas por los procedimientos de selección descritos anteriormente requieren una evaluación de cuál es la más adecuada, usualmente calculando cuál será la más económica. Esto requiere la disponibilidad de procedimientos para evaluar de manera realista los costes de fabricación a principios del proceso de diseño. En este proyecto se simplificarán los procedimientos de estimación de costes para varios procesos. Sin embargo, en las primeras etapas de diseño pueden usarse métodos más simples para la evaluación de costes para la clasificación de combinaciones alternativas de materiales y procesos.

Para hacer unas primeras estimaciones de costes para un proceso en particular, por ejemplo el mecanizado, la información requerida puede dividirse en tres áreas:

1. Datos de la pieza y de la producción.
2. Factores que afectan los costos no productivos.
3. Factores que afectan a los costos de mecanizado.

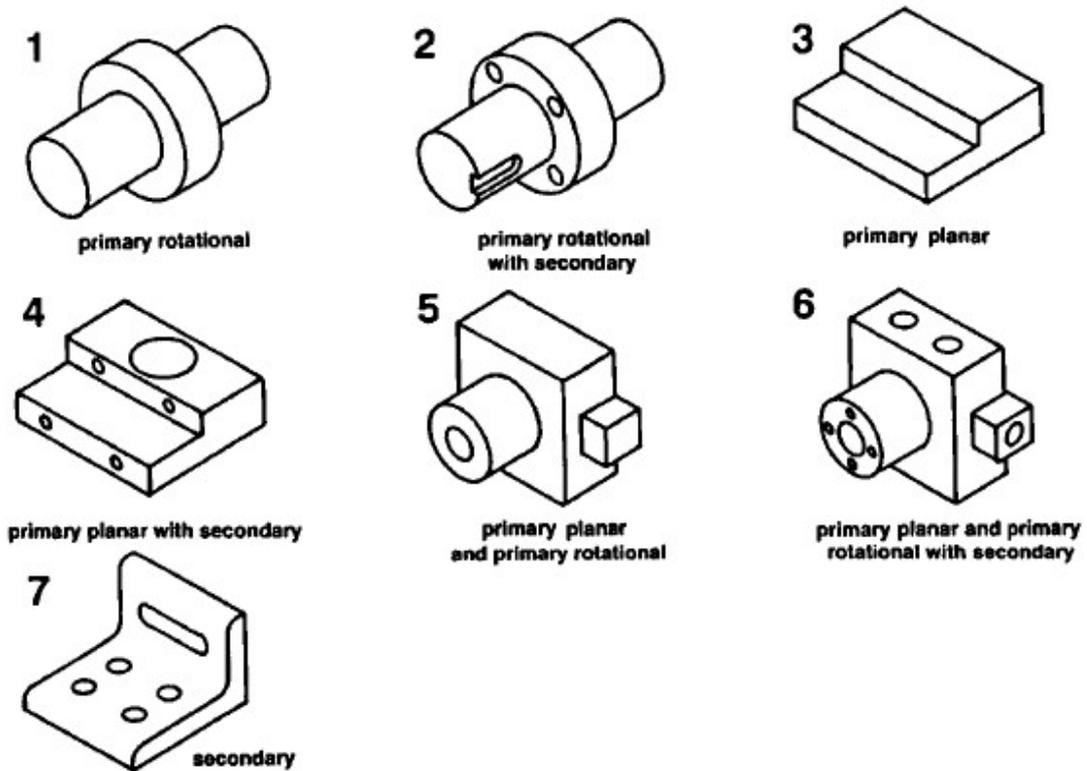
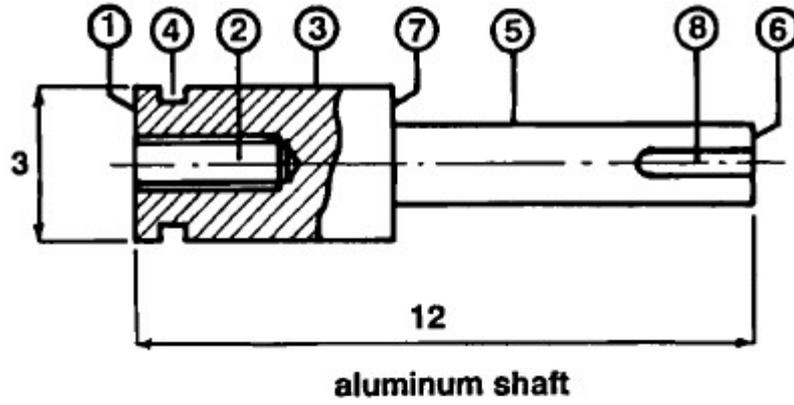


Ilustración. 2.7. Siete categorías básicas de componentes de las máquinas.

Las piezas comunes se pueden clasificar en siete categorías básicas, como se ilustra en la ilustración 2.7. Otros elementos de este primer encabezado incluyen: el material, la forma del material (tamaño estándar o forma cercana a la red), las dimensiones de la pieza de trabajo, el coste por unidad de peso, la velocidad media de la máquina y del operador y el tamaño del lote por configuración.

El conocimiento de los datos de la pieza y de la producción no sólo permite estimar el coste de la pieza de trabajo, sino que también permite predecir las magnitudes probables de los elementos restantes necesarios para las estimaciones de costes no productivos y costes de mecanizado.

Por ejemplo, para la pieza de trabajo mostrada en la ilustración 2.8, se calculó que el coste total del componente terminado era de 24,32 \$, cifra obtenida a partir del conocimiento del material de trabajo, su categoría general de forma y tamaño y su coste por unidad de volumen. Un cálculo de costes para este componente basado en sus características mecanizadas reales y usando ecuaciones aproximadas da un coste total de 22.83\$, que está dentro del 6% y una estimación más detallada obtenida usando métodos más tradicionales de estimación de costes da un coste total de 22.95\$.



Machine	Feature	Operations
Horizontal band saw	—	Cut off workpiece
CNC lathe	1	Finish face
	2	Center drill, drill, tap
	3	Finish turn
	4	Groove
	—	Reclamp
	5	Rough and finish turn
	6	Finish face
Vertical miller	7	Finish face
	8	End mill keyway

Ilustración 2.8 Categoría 2 rotacional parcial con características secundarias.

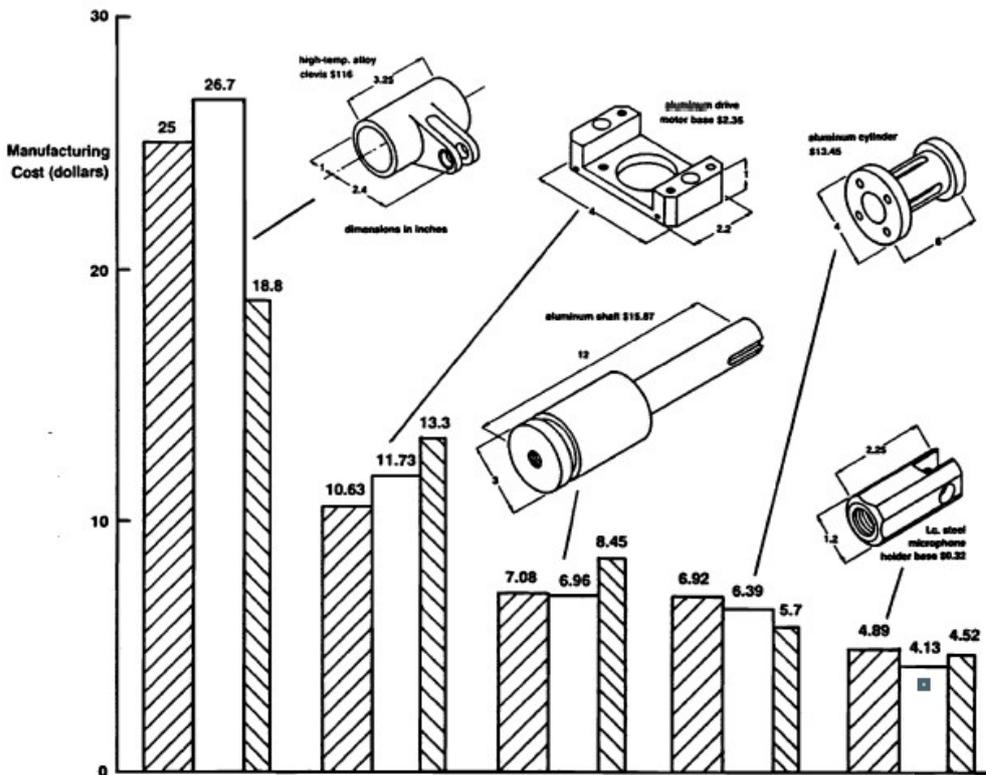


Ilustración 2.9. Comparación de estimaciones de costes de mecanizado. El costo indicado al lado de cada dibujo de la pieza es el costo del material para la pieza, H, análisis detallado; 0, estimación; A, estimación inicial.

Este ejemplo de mecanizado ilustra que es posible obtener estimaciones de costes fiables basadas en información de diseño general inicial y que tales estimaciones de costes pueden refinarse a medida que se disponga de información de diseño más detallada.

Como ejemplo se muestra la siguiente pieza, ilustración 2.10, para la cual se han determinado que los procesos compatibles adecuados para la fabricación de la pieza son:

- Fundición a presión.
- Forjado en caliente.
- Casting de inversión.
- Colado automático de arena.
- Procesamiento de metales en polvo.

Algunas de las características, en particular los orificios horizontales, deberán producirse mediante mecanizado secundario para algunos de los procesos, como se ilustra en la figura.

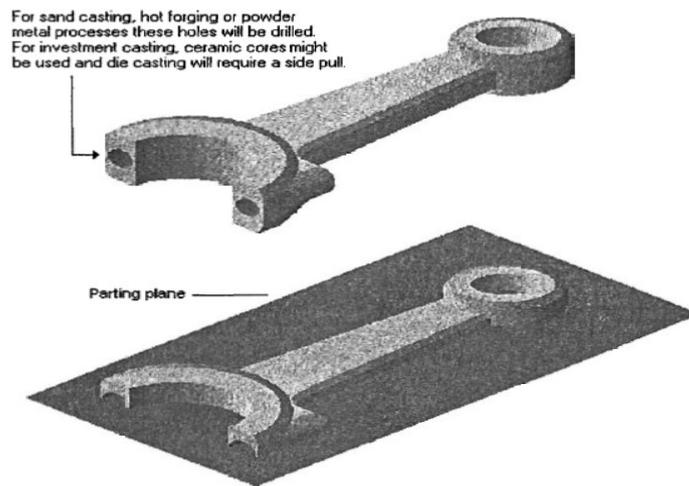


Ilustración 2.10 Vástago de conexión.

La ilustración 2.11 compara el coste estimado para los procesos seleccionados para diferentes volúmenes de producción. Estas estimaciones de costes incluyen los costes de herramientas y cualquier operación secundaria requerida. Estas curvas muestran que la metalurgia del polvo sería el proceso menos costoso para volúmenes de producción mayores de a 20.000 y que la forja en caliente sería más económica para volúmenes más pequeños.

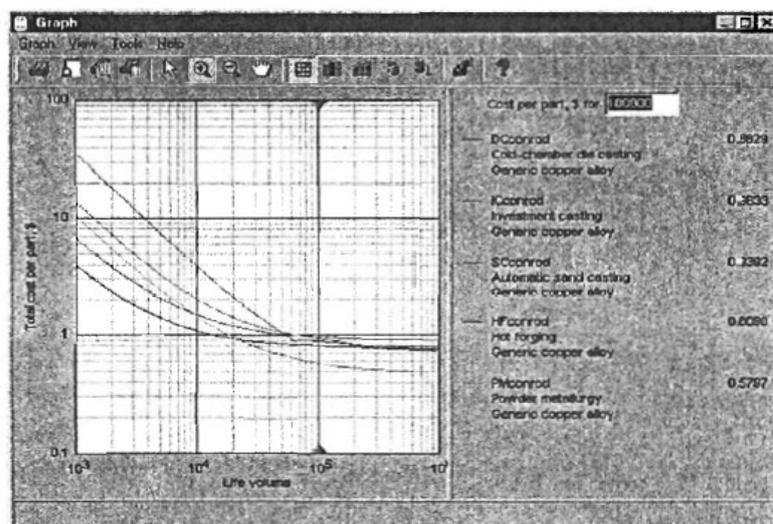


Ilustración 2.11 Costes de la biela para diferentes procesos y volúmenes de producción.

## 3. MECANIZADO.

### 3.1 Introducción.

**E**n el mecanizado, el material se retira de la pieza de trabajo hasta que se consigue la forma deseada. Claramente, esto es un proceso inútil, y muchos ingenieros sienten que un objetivo principal debe ser el diseño de componentes que no requieren mecanizado. Dado que la mayoría de las máquinas de fabricación están diseñadas para eliminar metales por mecanizado, la visión de que el mecanizado debe evitarse no debe considerarse en un futuro inmediato. Sin embargo, la tendencia hacia el uso de procesos de "cerca de la forma neta" que conservan el material, está aumentando claramente, y cuando se trata de una producción de gran volumen, este enfoque debería ser primordial en la mente del diseñador.

A continuación se describen los mecanizados comunes, considerando las maneras en que el material de trabajo se puede cambiar fácilmente a la forma deseada por mecanizado, y las maneras en que las superficies del componente están acabadas.

Todas las máquinas herramientas proporcionan medios para sujetar una herramienta de corte o una muela abrasiva, sujetar una pieza de trabajo, y proporcionar movimiento relativo entre ellos para generar las superficies requeridas.

### 3.2 Mecanizado Utilizando Herramienta de Corte Único.

#### TORNEADO.

Los tornos están diseñados para rotar la pieza y alimentar la herramienta de corte en la dirección necesaria para crear la superficie deseada.

La pieza de trabajo se sujeta en un mandril o se monta en una placa frontal montada en el extremo del eje principal de la máquina. La rotación de la pieza de trabajo es proporcionada por un motor eléctrico que acciona el husillo principal a través de una serie de engranajes. Las herramientas de corte pueden ser accionadas o alimentadas de forma paralela o normal al eje de rotación de la pieza de trabajo.

Los tornos modernos poseen control computarizado sobre todos los movimientos de las herramientas y de las piezas, en lo que se denomina control numérico por ordenador (CNC), y las herramientas pueden ser alimentadas en cualquier dirección en el plano horizontal para generar el contorno requerido en la pieza de trabajo.

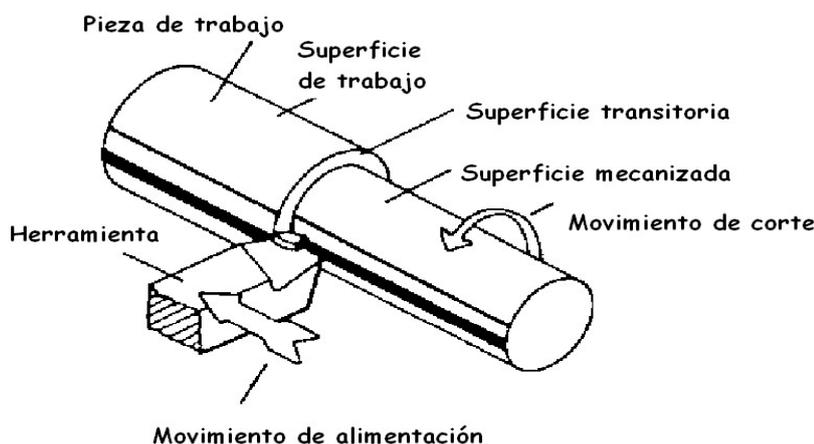


Ilustración 3.1 Torneado cilíndrico.

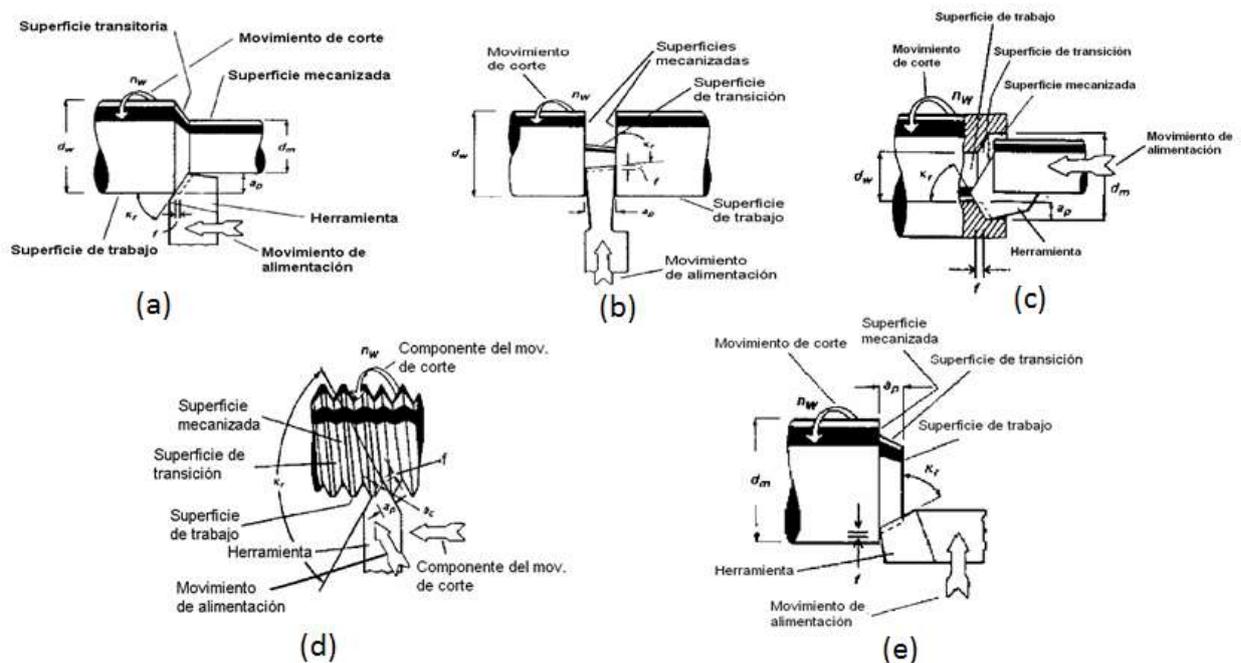


Ilustración 3.2 Operaciones del torno: a) cilindrado, b) tronzado, c) mandrinado, d) roscado exterior, e) refrentado.

La ilustración 3.2 ilustra cinco operaciones de torno típicas: cilindrado, tronzado, mandrinado, roscado externo y refrentado.

-**Tronzado:** Se hace para separar la pieza final de la barra de trabajo. Crea dos superficies mecanizadas. La velocidad de corte varía desde un máximo en el inicio hasta cero al final.

-**Mandrinado:** Genera superficies cilíndricas internas, y sólo se puede usar para agrandar huecos ya existentes. El mandrinado vertical (orientación del husillo que proporciona el movimiento de corte) sirve para piezas grandes, y, al igual que un torno, gira la pieza de trabajo. El mandrinado horizontal se necesita mayormente para piezas pesadas y de geometría no cilíndrica. Como principal característica, la pieza permanece quieta durante el mecanizado, y es la herramienta la que, montada en una barra unida al husillo, sufre todos los movimientos.

-**Roscado:** Ajustando la velocidad de giro de la pieza y la alimentación de la herramienta se crea una hélice en la superficie. Este mecanizado necesita varias pasadas de la herramienta, cada una de la cual retira una delgada capa de metal.

-**Refrentado:** El movimiento de alimentación en la herramienta es perpendicular al eje de rotación de la pieza.

En cada caso, se indican el movimiento primario y el movimiento de alimentación, junto con otros términos y dimensiones. En cualquier operación de mecanizado, la pieza de trabajo tiene tres superficies importantes:

1. La superficie de trabajo, la superficie de la pieza de trabajo que se va a retirar por mecanizado.
2. La superficie mecanizada, la superficie deseada producida por la acción de la herramienta de corte.
3. La superficie transitoria, la superficie formada por la cuchilla y eliminada por la carrera de la herramienta mientras se mecaniza.

Si la velocidad angular del torno es constante, la velocidad de corte disminuye desde un máximo al inicio del corte hasta cero cuando la herramienta llega al centro de la pieza. Con tornos CNC, la velocidad de giro se puede incrementar a medida que avanza la operación, con lo que el tiempo total de mecanizado disminuye.

Se usan tornos con varios husillos para grandes volúmenes de producción de pequeños componentes mecanizados a partir de una barra de metal. Los movimientos de estos tornos se controlan con un juego de levas, y todo el proceso es automático.

### 3.3 Mecanizado con Herramientas de Varios Puntos.

#### TALADRO

Una máquina perforadora sólo puede realizar aquellas operaciones en las que la herramienta es girada y alimentada a lo largo de su eje de rotación (ilustración. 3.3). La pieza de trabajo permanece siempre estacionaria durante el proceso de mecanizado. En las fresas pequeñas, la herramienta se alimenta mediante el accionamiento manual de una palanca (conocida como perforación sensible). La operación más común realizada en esta máquina es la perforación con un taladro de torsión para generar una superficie cilíndrica interna. Un taladro de torsión tiene dos filos de corte, cada uno de los cuales elimina su parte del material de trabajo.

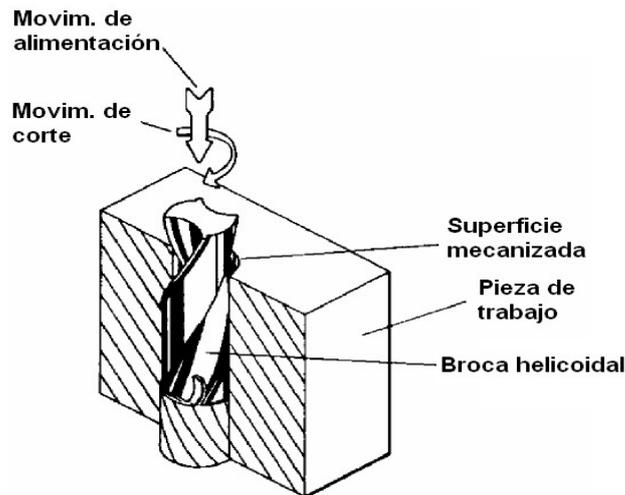


Ilustración 3.3. Perforación de una prensa de perforación.

Las brocas helicoidales son adecuadas para mecanizar agujeros con una longitud menor a 5 veces su diámetro. En caso contrario se ha de recurrir a otro tipo de taladros.

Con la prensa se pueden hacer otro tipo de operaciones:

- El centrado crea un agujero cónico y poco profundo que sirve como guía para evitar que en un siguiente taladrado la broca se desvíe.
- El escariado es una operación de acabado. La broca es similar a la del taladrado pero con muchos filos cortantes y estrías. Desprenden pequeñas cantidades de material, pero mejoran la precisión y el acabado superficial.
- El abocardado proporciona una superficie plana alrededor de la entrada del agujero, lo que puede servir de acomodo a tuercas y arandelas, por ejemplo.

#### FRESADORA

Hay dos tipos principales de fresadoras: horizontal y vertical. En la fresadora horizontal, la fresa está montada sobre un eje horizontal (o árbol) accionado por el husillo principal.

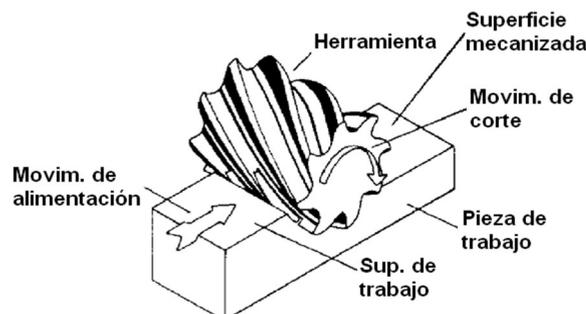


Ilustración 3.4. Fresado con una fresadora horizontal tipo rodilla.

## **BROCHA**

Es otra herramienta de mecanizado en varios puntos. La máquina genera el movimiento de corte (normalmente con un motor hidráulico), y el de alimentación lo dan los dientes en la brocha, cada uno de los cuales quita una fina capa de material.

El brochado se usa para crear agujeros no circulares, para lo cual se puede tirar de la brocha o bien empujarla a través de un agujero que se agranda hasta adoptar la forma buscada.

Las brochas han de diseñarse específicamente para cada caso, y son caras de hacer. El alto coste ha de tenerse en cuenta al compararse a métodos de mecanizado alternativos más lentos.

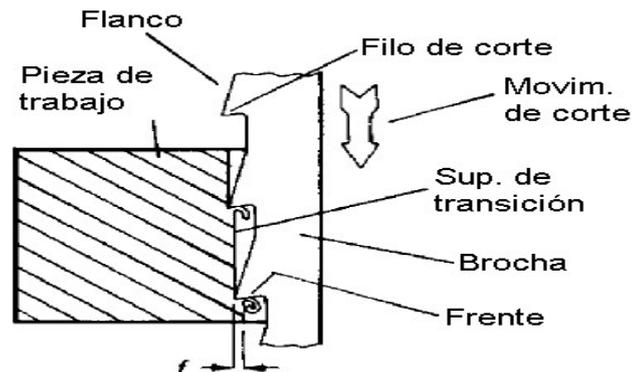


Ilustración 3.5. Brochado en una máquina de broche vertical.

La formación de roscas internas y externas se puede hacer con machos y matrices, herramientas de varios puntos que se pueden considerar como brochas helicoidales.

### **3.4 Mecanizado con Muelas de Rectificado.**

Las ruedas abrasivas son generalmente cilíndricas, en forma de disco o de copa. Las máquinas en las que se utilizan son llamadas rectificadoras, o amoladoras; Todas tienen un husillo que se puede girar a alta velocidad y en el que está montada la muela abrasiva. El husillo está soportado por cojinetes y montado en una carcasa; Este conjunto se denomina portamuela. Una transmisión por correa desde un motor eléctrico proporciona energía para el husillo. La rueda abrasiva consiste en granos individuales de material muy duro (usualmente carburo de silicio u óxido de aluminio) unidos de forma adecuada.

Se utilizan algunas veces para desbaste, donde el factor importante es el arranque de material, pero más comúnmente en operaciones de acabado, en donde importa más el aspecto de la superficie final.

En las herramientas de corte de metales descritas anteriormente, la generación de una superficie se obtiene normalmente aplicando una acción primaria a la herramienta o pieza de trabajo y un movimiento de alimentación a la herramienta o a la pieza de trabajo. En las máquinas rectificadoras, sin embargo, el movimiento primario es siempre la rotación de las ruedas abrasivas, pero a menudo se aplican dos o más movimientos de generación (alimentación) a la pieza de trabajo para producir la forma de superficie deseada.

En el rectificado cilíndrico la pieza está apoyada por los dos extremos y posee un movimiento de corte lento y uno transversal que se le imprime la mesa. El husillo de la herramienta es horizontal, y se le puede dar un movimiento de alimentación perpendicular al eje de rotación de la pieza.

Esta operación se puede comparar con la de torneado, con una herramienta de corte de varios puntos en lugar de una de uno solo.

El rectificado interno puede tener movimiento transversal en la herramienta, paralelo al eje del husillo. La herramienta gira a gran velocidad, aunque la pieza de trabajo (montada en un plato magnético) también tiene movimiento de giro. Es posible realizar las operaciones de cilindrado y tronchado con muela de rectificado.

### 3.5 Estimación de los Costes de Fabricación de una Pieza Mediante Mecanizado.

Un enfoque simple sería hacer que el diseñador especifique la forma y el tamaño de la pieza de trabajo original y la cantidad de material que debe retirarse mediante el mecanizado. A continuación, con datos sobre los costes típicos de los materiales por unidad de peso, se puede hacer una estimación del coste del material necesario para fabricar el componente. Si se dispone de una cifra aproximada para el coste medio de extracción de cada centímetro cúbico del material por mecanizado, también se calculará el costo de mecanizado.

Desafortunadamente, este enfoque muy limitado y no toma suficientemente en cuenta los costes no productivos involucrados en una serie de operaciones de mecanizado, por lo que se necesita un método que forme un compromiso entre este enfoque excesivamente simplificado y los métodos tradicionales de estimación de costes detallados utilizados por las industrias.

#### 3.5.1 Material de Trabajo.

El factor más importante en la estimación de coste de un componente mecanizado es el coste de la pieza de trabajo original, el cual representa normalmente más del 50% del coste total.

Al elegir el material para un componente, el diseñador debe considerar la aplicabilidad, el coste, la disponibilidad, la maquinabilidad y la cantidad de mecanizado requerida. Cada uno de estos factores influye en los otros, y la elección óptima final generalmente será un compromiso entre requisitos contradictorios. La aplicabilidad de varios materiales depende de la función eventual del componente y se decide por factores tales como resistencia, resistencia al desgaste, apariencia, resistencia a la corrosión, etc. Estas características del proceso de diseño están fuera del alcance de este estudio, pero una vez hecha la elección del material para un componente, el diseñador debe entonces considerar los factores que ayudan a minimizar el coste final del componente. No se debe asumir, por ejemplo, que un material de menos coste conllevará automáticamente a un coste mínimo para el componente. Por ejemplo, podría ser más económico elegir un material que sea menos costoso de mecanizar (más mecanizable) pero que tenga un costo de compra más alto.

En la tabla 3.1, se muestran los diferentes tipos de materiales utilizados para el mecanizado, junto con su densidad

Material	Densidad	
	lb/in <sup>3</sup>	Mg/m <sup>3</sup>
Carbon Steel	0,283	7,83
Alloy Steel	0,31	8,58
Stainless Steel	0,283	7,83
Tool Steel	0,283	7,83
Aluminum alloys	0,1	2,77
Brass	0,31	8,58
Nickel alloys	0,3	8,3
Magnesium alloys	0,066	1,83
Zinc alloys	0,23	6,37
Titanium alloys	0,163	4,51

TABLA 3.1 Materiales típicos para procesos de mecanizado.

Tipo de forma base a partir de la cual se empezará a trabajar.

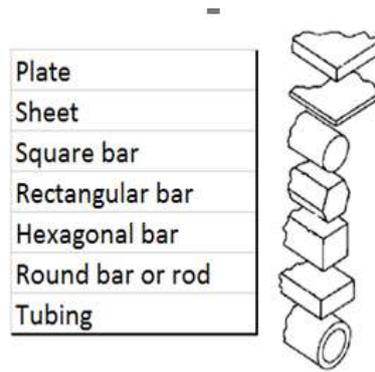


Ilustración 3.6. Formas típicas bases para el comienzo del moldeo mediante mecanizado.

### 3.5.1.1 Coste del Material.

El coste base del material vendrá dado por el producto del peso de la pieza por el precio del material de la cual está hecha:

$$C_{mp} = 2,2 * C_{DL} * \rho * V \quad \text{dónde}$$

{

- $C_{mp}$  es el coste del material de la pieza en €
- $C_{DL}$  es el coste del material en €/lb
- $\rho$  es la densidad del material de la pieza
- $V$  es el volumen de la pieza

### 3.5.2 Coste por Mecanizado.

En los costes de mecanizado de piezas se incluyen diversos valores:

Costes debido a los tiempos de carga y descarga de la máquina de mecanizado y el dispositivo de sujeción.

Costes no productivos debido a los tiempos empleados en:

- Posicionar la herramienta.
- Cambiar los ajustes de alimentación y velocidad de corte.
- Retirar la herramienta.

Costes de recambio de herramientas. Debido al desgaste las herramientas deben ser sustituidas produciendo dos costes:

- Coste de tiempo parado mientras el operador cambia la herramienta.
- Coste de un nuevo borde cortante o herramienta.

Coste producido por el transporte de piezas parcialmente mecanizadas entre máquinas.

Costes de mecanizado referido a los costes para cada corte, paso u operación durante el periodo entre el avance y retirada de la alimentación.

### 3.5.2.1 Tiempo de Mecanizado.

Para el cálculo del coste por operación de torneado y fresado lo primero que se hará es calcular el tiempo de mecanizado para potencia máxima y el tiempo de mecanizado para coste mínimo:

#### -Tiempo Torneado

$$t_{mp} = \frac{60 \cdot V_m \cdot p_s}{P_m} \qquad t_{mc} = \frac{60 \cdot A_m}{v \cdot f}$$

#### -Tiempo Fresado:

$$t_{mp} = \frac{60 \cdot V_m \cdot p_s}{P_m} \qquad t_{mc} = \frac{60 \cdot l_w}{v \cdot f}$$

Donde

$t_{mp}$  es el tiempo de mecanizado para potencia máxima.

$t_{mc}$  es el tiempo de mecanizado para coste mínimo.

$V_m = \pi d_m l_w a_p$  es el volumen de material que será eliminado por mecanizado.

$A_m = \pi l_w d_m$  es el área de la superficie.

$l_w$  es la longitud.

$d_m$  es el diámetro.

$a_p$  es la profundidad del corte.

$p_s$  es la energía específica de corte, (tabulado).

$P_m$  es la potencia disponible para mecanizado, (tabulado).

$vf$  es el producto de la velocidad de corte por el avance, (tabulado).

#### -Tiempos no productivos.

$$t_1 = t_{cd} + t_{pcr} + t_{tr} \qquad t_{tr} = \frac{t_f}{W_{cm}/W} \qquad t_f = 25,53 + 0,29(l_p + l_{rd})$$

$t_1$  es el tiempo no productivo.

$t_{cd}$  es el tiempo de carga y descarga para distintos dispositivos de sujeción y piezas de trabajo de diferente masa, (tabulado).

$t_{pcr}$  es el tiempo empleado en posicionar la herramienta, cambiar ajustes de alimentación y velocidad de corte y retirar la herramienta, (tabulado).

$t_{tr}$  es el tiempo empleado en el transporte por pieza.

$t_f$  es el tiempo empleado en un viaje de ida y vuelta.

$l_p$  es la longitud de paso entre máquinas (en pies).

$l_{rd}$  es la distancia que el vagón debe recorrer (en pies).

$W_{cm}$  es el peso de la bandeja de piezas para carga máxima.

$W$  es el peso de una pieza, que es igual a  $\rho \cdot V$ .

### 3.5.2.2 Coste por Operación de Torneado y Fresado.

El coste para una operación de desbaste a una velocidad de corte constante vendrá dado según:

Sí  $t_{mp} > t_{mc}$  la operación se realizará a potencia máxima, en los casos en que la velocidad de corte esté limitada por la potencia disponible en la herramienta de mecanizado

$$C_{po} = Mt_1 + Mt_{mp} \left[ 1 + \frac{n}{1-n} \left( \frac{t_{mc}}{t_{mp}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

Sí por el contrario  $t_{mc} > t_{mp}$  la operación se realizara a coste mínimo, y el coste vendrá dado por la siguiente expresión:

$$C_{min} = Mt_1 + \frac{Mt_{mc}}{1-n}$$

Donde

$M$  es la tasa total del operador y la máquina herramienta

$n$  es el índice de Taylor , que tomará el valor de 0,125 para aceros rápido y 0,25 para herramientas de carburo.

### 3.5.3 Coste por Operación de Rectificado Basto.

#### Tiempo de rectificado basto

$$t_{gc} = \frac{60V_m}{Z_w} \quad t_{gp} = \frac{60V_m p_s}{P_m}$$

Donde

$t_{gc}$  es el tiempo de rectificado basto para coste mínimo.

$t_{gp}$  es tiempo de rectificado basto para máxima potencia.

$V_m$  es el volumen de metal eliminado.

$Z_w$  es la tasa de metal eliminado.(tabulado)

$p_s$  es la energía específica de corte,(tabulado).

$P_m$  es la potencia disponible para mecanizado.

#### Coste por operación de rectificado basto.

Sí  $t_{gc} > t_{gp}$  la operación se realizará para una condición de coste mínimo.

$$C_c = Mt_c + 2Mt_{gc}$$

Sí por el contrario  $t_{gp} > t_{gc}$  la operación se realizara para una condición de potencia máxima, y el coste vendrá dado por la siguiente expresión:

$$C_p = Mt_c + Mt_{gp} \left[ 1 + \left( \frac{t_{gc}}{t_{gp}} \right)^2 \right]$$

$C_c$  es el coste de operación de rectificado para condición de coste mínimo

$C_p$  es el coste de operación de rectificado para condición de potencia máxima.

# 4. INYECCIÓN DE PLÁSTICOS.

## 4.1 Introducción.

La tecnología de moldeo por inyección es un método de procesamiento predominantemente usado para polímeros termoplásticos. Consiste en el calentamiento del material termoplástico hasta que se funde, luego forzando este plástico fundido en un molde de acero, donde se enfría y solidifica. Quizás el desarrollo de productos más ampliamente reconocido e innovador en este contexto fue el Proprinter desarrollado por IBM. Los componentes plásticos en el Proprinter incorporaron las funciones de muelles, cojinetes, soportes y elementos de sujeción en componentes de encaje a presión únicos. El resultado de esta integración de características en partes complejas únicas fue una reducción del número de piezas de 152 a 32, con una reducción correspondiente del tiempo de montaje de 30 a 3 min, en comparación con la impresora Epson que IBM había fabricado anteriormente.

Con el fin de aprovechar la versatilidad de la tecnología de moldeo por inyección para la fabricación económica, es necesario comprender los mecanismos básicos del proceso y los aspectos relacionados de los equipos de moldeo y los materiales utilizados.

Además, dado que el moldeo por inyección es un proceso que utiliza herramientas y equipos caros, es vital poder obtener estimaciones de costes de piezas y herramientas en las primeras etapas del diseño. Sólo de esta manera el equipo de diseño puede estar seguro de que la elección del proceso es correcta y que se obtendrá la máxima ventaja económica del proceso.

## 4.2 Materiales de Moldeo por Inyección.

No es posible moldear por inyección todos los polímeros. Algunos polímeros, no se pueden moldear por inyección. Otros polímeros, tales como una mezcla de resina y fibra de vidrio en forma de tejido o tela, no son adecuados por su naturaleza física para uso en el proceso. En general, los polímeros que son capaces de llevar a un estado de fluidez pueden moldearse por inyección.

La gran mayoría del moldeo por inyección se aplica a polímeros termoplásticos.

Esta clase de materiales son polímeros que siempre tienen la capacidad de ser ablandados por el calor y de endurecerse por enfriamiento, incluso después de ciclos repetidos. Esto se debe a que las moléculas de cadena larga siempre permanecen entidades separadas y no forman enlaces químicos entre sí. Se puede hacer una analogía con un bloque de hielo que puede ser derretido, vertido en cualquier cavidad con forma, luego enfriado para convertirse de nuevo en un sólido. Esta propiedad diferencia los materiales termoplásticos de los termoestables. En el último tipo de polímero, se forman enlaces químicos entre las cadenas de moléculas separadas durante el procesamiento. Este enlace químico, denominado reticulación, es el mecanismo de endurecimiento. Los polímeros termoestables son generalmente más caros de moldear que los termoplásticos y representan sólo aproximadamente el 5% del procesamiento de plástico.

En general, los materiales termoplásticos ofrecen alta resistencia al impacto, buena resistencia a la corrosión y fácil procesamiento con buenas características de flujo para moldear diseños complejos. Los termoplásticos se dividen generalmente en dos clases: cristalinos y amorfos. Los polímeros cristalinos tienen una disposición molecular ordenada, con un punto de fusión agudo. Debido a la disposición ordenada de las moléculas, los polímeros cristalinos reflejan la luz más incidente y generalmente son opacos. También sufren un alto encogimiento o reducción del volumen durante la solidificación. Los polímeros cristalinos suelen ser más resistentes a los disolventes orgánicos y tienen buenas propiedades de fatiga y resistencia al desgaste. Los polímeros cristalinos también son generalmente más densos y tienen mejores propiedades mecánicas que los polímeros amorfos. La principal excepción a esta regla es el policarbonato, que es el polímero amorfo de elección para molduras transparentes de alta calidad y tiene excelentes propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas de los termoplásticos, aunque sustancialmente inferiores a los de los metales, se pueden mejorar para algunas aplicaciones añadiendo refuerzo de fibra de vidrio. Las fibras pueden ocupar hasta un tercio del volumen del material para mejorar considerablemente la resistencia del material y la rigidez. El efecto negativo de este refuerzo suele ser una disminución en la resistencia al impacto y un aumento en la abrasividad. Este último también tiene un efecto en el procesamiento, ya que la vida útil de la cavidad del molde se reduce típicamente de aproximadamente 1.000.000 para las piezas de resina lisas a aproximadamente 300.000 para las piezas rellenas de vidrio.

Tal vez la principal debilidad de las piezas moldeadas por inyección es la temperatura de servicio relativamente baja a la que pueden ser sometidas. La temperatura a la cual se puede operar un termoplástico bajo carga puede definirse cualitativamente por la temperatura de deflexión térmica.

TERMOPLÁSTICOS
Poliétileno de alta densidad
Poliestireno de alto impacto
Acrilonitrilo-butadieno-estireno(ABS)
Acetato
Poliamida(6/6 Nylon)
Policarbonato
Policarbonato(30% cristal)
Óxido de polifenileno modificado(PPO)
PPO modificado(30% cristal)
Polipropileno(40% talco)
Poliéster teleftalato(30% cristal)

TABLA 4.1. Polímeros comúnmente utilizados en el moldeo por inyección.

### 4.3 El Ciclo de Moldeo.

El ciclo de proceso de moldeo por inyección para termoplásticos consta de tres etapas principales como se muestra en la ilustración 4.1: (1) inyección o llenado, (2) enfriamiento, y (3) expulsión y reposición. Durante la primera etapa del ciclo del proceso, el material en estado fundido es un fluido viscoso altamente no lineal. Fluye a través de los pasajes complejos del molde y está sujeto a un rápido enfriamiento por la pared interior, por una parte, y a la calefacción por cizalladura interna, por otra. La masa fundida polimérica se somete a continuación a solidificación bajo la alta presión de empaquetamiento y sujeción del sistema de inyección. Finalmente se abre el molde, se expulsa la pieza y se reinicia la máquina para que comience el siguiente ciclo.

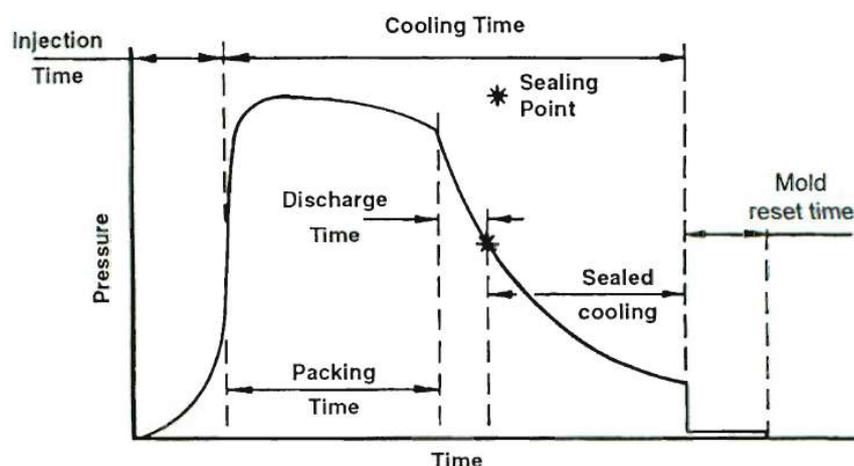


Ilustración 4.1. Ciclo de moldeo por inyección.

### Etapa de inyección o llenado.

La etapa de inyección consiste en la carrera hacia adelante del émbolo o unidad de inyección para facilitar el flujo de material fundido, desde el cilindro de calentamiento a través de la boquilla y dentro del molde. La etapa de inyección se acompaña de un aumento gradual de la presión. Tan pronto como se llena la cavidad, la presión aumenta rápidamente y se produce el empaque. El tiempo de empaquetado depende de las propiedades de los materiales que se moldean. Después del empaquetado, el émbolo de inyección se retira o el tornillo se retrae y la presión en la cavidad del molde comienza a caer. En esta etapa, la siguiente carga de material se introduce en el cilindro de calentamiento en preparación para el siguiente disparo.

### Etapa de refrigeración o congelación.

El enfriamiento comienza desde el primer llenado rápido de la cavidad y continúa durante el empaquetado y luego después de la retirada del émbolo, con la consiguiente eliminación de presión del molde y el área de la boquilla. Debido a la caída de presión, existe la posibilidad de flujo inverso del material desde el molde hasta que se solidifica el material adyacente a la compuerta y se alcanza el punto de sellado.

Después del punto de sellado, hay una caída continua de presión a medida que el material continúa enfriándose en la cavidad y se solidifica en preparación para la expulsión.

La longitud de la etapa de refrigeración sellada es una función del espesor de pared de la pieza, del material utilizado y de la temperatura del molde. Debido a la baja conductividad térmica de los polímeros, el tiempo de enfriamiento es usualmente el período más largo en el ciclo de moldeo.

### Etapa de Eyección y Reinicio.

Durante esta etapa, se abre el molde, se expulsa la pieza y se cierra de nuevo el molde para que comience el siguiente ciclo. Se requieren cantidades considerables de energía para mover los moldes, y la apertura del molde y la expulsión de la pieza se ejecutan generalmente mediante dispositivos hidráulicos o mecánicos.

Aunque es económico tener una apertura y un cierre rápidos del molde, los movimientos rápidos pueden causar una tensión excesiva en el equipo, y si las caras del molde entran en contacto a velocidad, esto puede dañar los bordes de las cavidades. Además, se debe permitir el tiempo adecuado para la eyección del molde. Este tiempo depende de las dimensiones de las piezas. Para las piezas a moldear con insertos metálicos, el reajuste implica la recarga de insertos en el molde. Después de reajustar, el molde se cierra y bloquea, completando así un ciclo.

## 4.4 Sistemas de Moldeo por Inyección.

Un sistema de moldeo por inyección consiste en la máquina y el molde para convertir, procesar y formar materia prima termoplástica, usualmente en forma de pellets, en una pieza de forma y configuración deseadas. La ilustración 4.2 muestra una vista esquemática de un sistema de moldeo por inyección típico. Los componentes principales de un sistema de moldeo por inyección son la unidad de inyección, la unidad de sujeción y el molde.

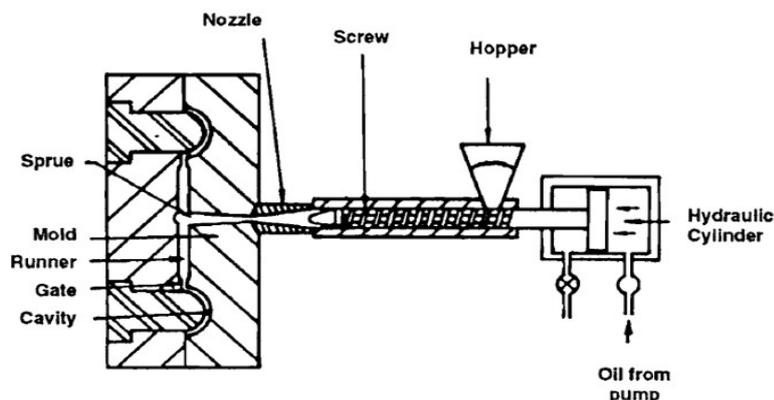


Ilustración 4.2. Sistema de moldeo por inyección.

*La unidad de inyección* tiene dos funciones: fundir los gránulos o polvo, e inyectar la fusión en un molde. Los tipos de unidades de inyección más utilizados son unidades convencionales, consistentes en un cilindro y un émbolo que obliga al plástico fundido a entrar en la cavidad del molde o unidades de tornillo alternativo, constituidas por un cilindro y un tornillo que gira para fundir y bombea la mezcla de plástico de la tolva al extremo del tornillo, y luego avanza hacia adelante para empujar la masa fundida dentro del molde.

*La unidad de sujeción* tiene tres funciones: abrir y cerrar las mitades del molde, expulsar la pieza y mantener el molde cerrado con suficiente fuerza para resistir la presión de fusión dentro del molde a medida que se llena. La fuerza de sujeción requerida típicamente varía entre 30 y 70 MN / m<sup>2</sup> de área proyectada de la pieza (aproximadamente 2 a 5 ton / pulgada).

Después de que se han abierto las mitades del molde, la parte que tiene tendencia a encogerse y pegarse al núcleo del molde (usualmente la mitad del molde más alejado de la unidad de inyección) tiene que ser expulsada por medio de un sistema eyector proporcionado en el dispositivo de la unidad de sujeción. La fuerza necesaria para expulsar la pieza es una función del material, la geometría de la pieza y la presión de empaque.

## **4.5 Moldes de Inyección.**

Los moldes para moldeo por inyección son tan variados en diseño, grado de complejidad y tamaño como son las piezas producidas a partir de ellos. Las funciones de un molde para termoplásticos son básicamente para impartir la forma deseada al polímero plastificado y después para enfriar la pieza moldeada.

Un molde se compone de dos conjuntos de componentes: las cavidades y núcleos, y la base en la que se montan las cavidades y los núcleos. El tamaño y el peso de las piezas moldeadas limitan el número de cavidades en el molde y también determinan la capacidad del equipo requerido. A partir de la consideración del proceso de moldeo, debe diseñarse un molde para absorber con seguridad las fuerzas de sujeción, inyección y expulsión.

Además, el diseño de las compuertas y correderas debe permitir un flujo eficiente y un llenado uniforme de las cavidades del molde.

### **Tipos de Moldes.**

Los moldes más comunes utilizados en la industria son: moldes de dos placas, moldes de tres placas, moldes de acción lateral y moldes de desenroscado.

## **4.6 Estimación de Costes de Fabricación de una Pieza Mediante Moldeo por Inyección de Plásticos.**

### **4.6.1 Costes de Fabricación del Molde.**

Para llevar a cabo una estimación de los costes de fabricación del molde es necesario dividir éste en dos partes, en primer lugar el coste de la base y a continuación la fabricación del molde incluyendo los elementos exteriores auxiliares así como acabados superficiales.

#### **4.6.1.1 Costes de la Base del Molde.**

Para la estimación de los costes derivados de la fabricación de la base del molde se recurre a la siguiente expresión:

$$C_b = 1000 + 0.45 \times A_c \times h_p^{0.4}$$

Siendo:

- $C_b$  : Coste de la base del molde
- $A_c$  : Área de la placa del molde en  $cm^2$  (combinación de área requerida por la cavidad y distancia mínima de 7.5 cm entre cavidad-cavidad y borde-cavidad)
- $h_p$  : Profundidad (combinación de espesores de cavidad y distancia mínima requerida entre cavidad-bordes)

Notar que la expresión anteriormente mostrada surge del ajuste de la misma a la tendencia de costes obtenida por Dewhurst y Kuppurajan en 1987 frente a la variación de parámetros relativos al área y espesor.

Planteada la ecuación, en primer lugar se procede a realizar el cálculo de coste de la base del molde, considerando una única cavidad con la finalidad de emplear este dato para un posterior cálculo del número de cavidades óptimas.

#### 4.6.1.2 Costes de las Cavidades y Machos.

En este apartado se calculan los gastos asociados a la fabricación del molde, incluyendo todos los dispositivos que éste necesita para dar la forma final a la pieza deseada. En primer lugar se va a calcular el número de horas requeridas para la fabricación de cada elemento y posteriormente a partir de un coste estimado de mano de obra, se podrá estimar el coste final asociado a la fabricación del molde.

#### Eyectores

La relación que aproxima el número de eyectores/extractores necesarios en un molde, se basa en las proyecciones ortogonales de la pieza y tiene la siguiente expresión:

$$N_e = A_p^{0.5}$$

$N_e$  es el número de eyectores requeridos y  $A_p$  el área proyectada de la pieza en  $cm^2$ .

Asumiendo que el tiempo de fabricación es de 2.5 horas por cada extractor, el número de horas adicional de fabricación será:

$$T_e = 2.5h \cdot N_e$$

#### Mecanizado del molde.

A partir de la relación empírica de Archer (1988) se puede estimar el número de horas de mecanizado del molde, que está asociado con la geometría de la pieza. La complejidad geométrica de la pieza se tiene en cuenta en el coste del molde asignando un índice de complejidad de 0 a 1 para las caras interior ( $X_i$ ) y exterior ( $X_o$ ) de la pieza. La relación es la siguiente:

$$T_x = 5.83(X_i + X_o)^{1.27}$$

Para estimar los índices de complejidad se emplea la siguiente relación:

$$X = 0.1 \cdot N_s$$

Donde  $N_s$  es el número de secciones de superficie separadas en el interior o exterior de la pieza según corresponda. Incluyendo aquellos planos que cambian de curvatura y que están en contacto durante el moldeo con el corazón o con las proyecciones de los machos.

#### Coste de la cavidad.

El número de horas de fabricación para una cavidad se puede representar por:

$$T_c = 5 + 0.85 \cdot A_p^{1.2}$$

## Costes adicionales.

Para hacer una estimación completa de los costes de fabricación, hay que tener en cuenta también los siguientes aspectos:

- Se añaden 200 horas extra debido a la fabricación de machos
- Apariencia
- **Nivel de tolerancia.**
- La forma del **plano de separación** de la cavidad y del corazón también aumenta el coste, cumpliendo una expresión del tipo:

$$T_s = f_p \cdot A_p^{0.5}$$

Donde el factor  $f_p$  está tabulado según el tipo de plano de separación requerido.

## Número óptimo de cavidades.

En este apartado se va a estimar el número óptimo de cavidades que debería tener el molde, para minimizar los costes totales de fabricación. Para poder llegar a una solución será necesario dimensionar la inyectora de la que dispondrá la máquina para el caso de una cavidad e iterar a continuación con las relaciones de las que se dispone para obtener el número de cavidades.

### Dimensionado de la inyectora.

En primer lugar se supondrá que el número de cavidades es 1 para obtener los datos necesarios para calcular el número óptimo de cavidades, como son la fuerza de la inyectora y el tiempo de ciclo de la máquina. Los pasos a seguir son los siguientes:

#### 1. Área proyectada total.

En este dato se incluye no solo el área de la pieza si no también el área que corresponde al sistema de alimentación.

$$A_{p_{total}} = A_p \cdot 1.324 \cdot N_c = cm^2$$

Donde  $A_p$  es el área proyectada de la pieza en  $cm^2$  y  $N_c$  el número de cavidades de la máquina.

#### 2. Presión máxima en las cavidades.

La presión de inyección recomendada  $p_r$  es función del material y la presión de inyección máxima en las cavidades será  $p_r/2$ .

#### 3. Fuerza máxima que soporta el molde.

Se estima la fuerza máxima en el molde como el producto del área proyectada por la presión de inyección máxima.

$$F = A_{p_{total}} \cdot p_r$$

#### 4. Capacidad de llenado.

La Capacidad de llenado (shot size) ( $V_s$ ) requerida es igual al volumen de las piezas más el volumen del sistema de alimentación:

$$V_s = A_{p_{total}} \cdot H = cm^3$$

Donde  $H$  es el espesor de la pieza.

#### 5. Carrera de vaciado.

La carrera de vaciado necesaria será de:  $2 \cdot H + 5 = cm$

A partir de estos datos obtenidos es posible escoger, de un catálogo, una inyectora capaz de proporcionar la

fuerza máxima requerida. La inyectora seleccionada requiere una potencia  $P_i$  y tiene un tiempo de ciclo de  $t_c$  en segundos.

## 6. Tiempo de ciclo.

Por último el tiempo de ciclo de la inyectora se calcula como la suma de los siguientes términos:

$$t = t_f + t_r + t_s + t_{cs}$$

El tiempo de ciclo en seco  $t_{cs}$  viene tabulado para cada máquina de inyección.

El tiempo de llenado  $t_f$ :

$$t_f = t_{mc} \cdot V_s \cdot \frac{p_r}{P_i} = \text{seg}$$

Donde  $t_{mc}$  es el tiempo de operación de la mordaza, y se estima en 2 segundos.

El tiempo de reposición  $t_r$ :

$$t_r = 1 + 1.75 \cdot t_{cs} \left[ \frac{2H + 5}{V_s} \right]^{0.5} = \text{seg}$$

Y por último el tiempo de secado que se estima en 2 segundos.

El tiempo completo del ciclo de la inyectora es de:

$$t = t_f + t_r + t_s + t_{cs} = \text{seg}$$

Tras haber calculado la fuerza necesaria y el tiempo de llenado es posible proceder con la estimación del número óptimo de cavidades.

El modo de proceder consiste en calcular el coste total de fabricación de las piezas y a partir de la expresión obtenida, derivar con respecto al número de cavidades  $n$  para conseguir un coste total que sea mínimo.

Para ello en primer lugar se plantea la relación que permite calcular el coste total de fabricación:

$$\begin{aligned} C_t &= [\text{coste de operación}] + [\text{coste molde}] + [\text{coste polímero}] = \\ &= [(N_t/n)(k_1 + m_1 \cdot F)t] + [C_{c1} n^m] + [N_t C_m] \end{aligned}$$

Donde  $N_t$  es el número total de piezas a fabricar,  $n$  el número de cavidades,  $t$  es el tiempo completo de ciclo;  $C_{c1}$  y  $C_m$  representan los costes del molde con una única cavidad y el coste del material respectivamente. Por último las constantes  $k_1$  y  $m_1$  son típicas de la máquina de inyección escogida y  $m$  es el índice de multicavidad con un valor estimado de 0.7.

A partir de esta expresión, es posible obtener la  $n$  que minimiza dicho coste sin más que diferenciar con respecto a  $n$  e igualar a cero. De esta manera el número de cavidades óptimas que se obtiene es el siguiente:

$$n = [N_t \cdot k_1 \cdot t / (m \cdot C_{c1})]^{1/m+1}$$

Llegado a este punto es necesario volver a calcular la fuerza necesaria por la máquina y comprobar que la inyectora anteriormente escogida, es capaz de proporcionar la fuerza requerida o escoger una nueva, la cual me proporciona un nuevo tiempo de ciclo, y por lo tanto un nuevo tiempo del ciclo completo.

### 4.6.2 Costes del Polímero.

Es un valor estimado para cada tipo de polímero en €/kg.

### 4.6.3 Costes de Operación.

Por último es necesario calcular los costes asociados a la operación de las máquinas, para estimar este valor se emplea la siguiente relación:

$$C_o = (N_t/n)(k1 + m1 \cdot F)t = \$$$

Donde el tiempo  $t$  es el calculado anteriormente para un ciclo, por lo que sus unidades reales serían segundos/pieza (hay que pasarlo a horas/pieza para que haya concordancia de unidades), de ahí que las unidades finales sean \$.

### 4.6.4 Costes Totales.

Finalmente la expresión que recoge el coste final de fabricación de  $n$  piezas es:

$$\begin{aligned} C_t &= [\text{coste de operación}] + [\text{coste molde}] + [\text{coste polímero}] = \\ &= [(N_t/n)(k1 + m1 \cdot F)t] + [C_f n^m + C_b] + [N_t C_m] \end{aligned}$$

Donde  $C_f$  y  $C_b$  son los costes anteriormente calculados de fabricación del molde y base del molde respectivamente.  $C_m$  el coste del material y  $F$  la fuerza necesaria para la inyectora para el número de cavidades óptimas.

Finalmente el precio de fabricación por pieza viene dado por:

$$C_p = \frac{C_t}{N_t} = \$$$

# 5. FORJA.

## 5.1 Introducción.

El forjado en caliente, es un proceso que puede usarse para producir una amplia variedad de piezas en la mayoría de los metales. Las piezas forjadas pueden tener tamaños que varían desde unos pocos milímetros hasta un máximo de 3 metros.

El procedimiento básico para la forja en caliente es relativamente sencillo. El material metálico en forma de una barra o billete se calienta primero para mejorar la ductilidad. A continuación, el material es exprimido o martillado en una serie de matrices de acero de herramienta para convertir el material en la forma deseada. El exceso de material en forma de rebaba se produce como una parte necesaria de la forja, y la etapa de procesamiento final es eliminar la rebaba para producir la pieza forjada final. El forjado en caliente es un proceso de forma casi definitiva, pero todas las piezas forjadas requieren algún mecanizado posterior, en particular para superficies que tienen que estar en contacto con otras superficies durante el montaje final de un producto.

## 5.2 Características del Proceso de Forja.

La mayoría de las piezas forjadas requieren una serie de etapas de formación, llamadas preformas, para convertir el material de partida inicial en la forma de forjado final. El número de preformas requeridas depende de varios factores, incluyendo la forma general, la complejidad de la forma y el material de la pieza. La complejidad de la forja se ve incrementada por varias características, entre ellas:

- La presencia de secciones delgadas.
- Cambios grandes en la sección transversal.
- Formas que requieren de un dado partido.

### 5.2.1 Tipos de Procesos de Forja.

*Forjado en dado abierto:* Donde se utilizan una serie de dados con formas sencillas. El material inicial va adoptando paulatinamente la forma final mediante el golpeo sobre los distintos dados.

*Forjado en dado cerrado:* Donde se utilizan una serie de distintas formas para convertir el material inicial en la forma final forjada. El término forjado en dado cerrado no es muy adecuado ya que las cavidades del dado no están completamente cerradas y el material en forma de rebaba fluye por la línea de unión de ambas cavidades.

## 5.3 El Papel de la Rebaba en la Forja.

La rebaba producida durante el forjado con dado cerrado es material de desecho y en muchos casos puede tener un volumen de más del 50% del volumen final de la pieza. La cantidad de rebaba producida aumenta con la complejidad de la pieza. Es una parte necesaria del proceso, y su control es esencial para asegurar un correcto llenado, en particular para piezas delgadas y altas.

La selección de unos valores apropiados para la geometría de la cavidad para la rebaba es crítico para el llenado del dado durante la forja, sin excesivas cargas de forjado y presiones en la cavidad.

### **5.3.1. Determinación de la Geometría de la Zona de Rebaba.**

El canalón tiene que ser suficientemente grande como para acumular la rebaba producida. Si la geometría está mal, las matrices no llenarán completamente o las cargas de forjado pueden ser excesivas.

El área proyectada de la zona de rebaba se incluye generalmente en el total del área proyectada como parte de la estimación de las cargas de forjados requeridas y es por tanto un factor determinante en la selección del equipamiento para el proceso.

La determinación de las dimensiones de la zona de rebaba se basa en la experiencia. Como resultado, existen una gran cantidad de expresiones empíricas para determinar esta geometría.

### **5.3.2. Cantidad de Rebaba.**

Los costes para el material en la forja se determinan por el peso de la pieza forjada final y del material que se pierde en el procesado.

Las pérdidas de material son principalmente debidos a la rebaba producida durante la forja, pero se pueden producir más pérdidas debido a que algunos materiales se pueden oxidar significativamente durante el calentamiento.

La estimación de estas pérdidas es difícil de realizar y se basa normalmente en la experiencia.

Existen dos aproximaciones básicas para realizar la estimación:

- 1) Se usan datos estadísticos que dan relaciones entre peso del material bruto y el de la pieza final para diferentes tipos de pieza.
- 2) El uso de valores promedio de cantidad de rebaba por unidad de longitud de la línea de rebaba para diferentes pesos de la forja.

### **5.3.3. Membranas.**

Las membranas son secciones delgadas con un área proyectada grande en la dirección de cierre del dado. La presencia de estas membranas incrementa considerablemente los requerimientos de carga durante el proceso de forja.

Es frecuente que al final de la forja sea necesario eliminar estas membranas lo que redonda en un incremento en los costes debido a la propia operación de eliminación y al material que se pierde al hacerlo. El espesor apropiado para estas membranas depende del área proyectada del agujero que llena.

## **5.4. Material de Exceso.**

Las piezas que se producen por forjado en caliente requieren un mecanizado posterior en las superficies, que en su uso final estarán en contacto con otros productos. Por lo que la pieza tendrá una cantidad de material de posterior rebajado en las zonas que serán mecanizadas.

El material de exceso para el mecanizado depende de distintos factores, pero en particular de la cantidad de oxidación que resultará del calentamiento de la pieza durante la forja. El nivel de oxidación dependerá del tipo de material y del tamaño total de la pieza a forjar.

Finalmente, todos los lados y esquinas en una pieza deben tener un radio añadido. Este radio es necesario para

que el material fluya mejor y aseguremos un buen llenado del dado. Además, las esquinas afiladas pueden dar lugar a fracturas como resultado de concentraciones de tensiones.

## 5.5. Preformas Durante la Forja.

En la práctica pocos forjados se producen en una sola etapa, ya que esto daría lugar a una gran cantidad de rebaba y necesitaríamos unas cargas muy grandes para asegurar un llenado del dado correcto.

Por lo tanto, en la mayoría de los casos son necesarias operaciones de preformado para convertir la pieza en bruto original en lo más parecido a lo que será la pieza final de forma gradual, antes de realizar el último paso en el dado de acabado. El número y el tipo de las operaciones de preforma depende en gran medida de la forma final de la pieza forjada.

Los estadios iniciales en la preforma son relativamente sencillos, al tratarse de operaciones de forjado en dado abierto, cuyo propósito es distribuir el material para que se parezca lo más posible a la distribución de masas de la pieza final. Esto se consigue usando dados relativamente sencillos que se llaman llenadores.

### 5.5.1. Diseño del Dado.

Normalmente se necesitan diferentes dados impresores para realizar un proceso de forjado completo. Para martillos pequeños y medianos estos dados se presentan formando un solo bloque, tal y como muestra la ilustración 5.1. Para los forjados mayores, las distintas etapas se tendrán que llevar a cabo en máquinas separadas con el recalentamiento del material de forjado entre las distintas etapas.

Para forjados de precisión, los distintos dados impresores podrían montarse insertados unos en otros en un único bloque o por separado.

Para dados con múltiples impresiones, éstas deben presentarse en la superficie del dado de forma que permita un forjado con éxito con un tamaño mínimo de dado. La profundidad del dado debería ser suficiente para permitir las distintas profundidades de las cavidades de impresión.

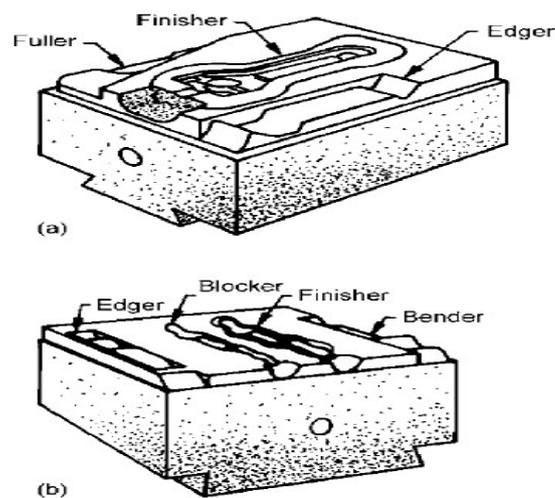


Ilustración 5.1. Dado de forja típica de martillos de múltiples impresiones.

Algunos dados con línea de partición vienen provistos de unas matrices o registros que previenen piezas mal hechas durante la forja. Las matrices del dado absorben las cargas laterales producidas, pero añaden tamaño al bloque del dado e incrementa los costes de maquinación de éstos.

Para ser efectiva, la matriz del dado debe encajar justo antes que la parte superior del dado entre en contacto con la pieza a forjar. Se recomienda un solapamiento de 10 a 13 mm., y para permitir una fuerza adecuada, el ancho del bloqueo debe ser al menos de 1,5 veces la profundidad del mismo.

## 5.6. Eliminación de la Rebaba.

El paso final en la forja en caliente es la eliminación de la rebaba para dar lugar a la pieza forjada final. La rebaba que se elimina es chatarra y puede representar el 50% del material usado en algunos forjados. Generalmente se elimina con un dado de recorte, que corta la rebaba de la línea de corte de la forja.

El recorte de la rebaba puede hacerse de manera habitual en una prensa mecánica, justo al lado de la máquina principal de forjado, con la pieza forjada aún caliente, aunque el recorte también puede hacerse con la pieza fría, para que las cargas a aplicar sean menores.

La rebaba también se puede eliminar mediante mecanizado, pero es lento y relativamente caro, por lo que este método sólo se tiene en cuenta para pequeñas cantidades de piezas o para algunos forjados grandes.

## 5.7. Clasificación de las Forjas.

Las piezas se clasifican basándose, no en la presencia de huecos, depresiones o nervios, sino en una evaluación numérica de su complejidad. Las piezas se dividen en primer lugar en clases principales determinadas por las dimensiones globales del envoltorio rectangular que las contiene (ilustración 5.2).

First Digit	Description	
0	Compact Parts, $L/W \leq 2, L/T \leq 2$	
1	Flat Parts, $L/W \leq 2, L/T > 2$	L/W
2	Long Parts, $L/W > 2$	Main Axis Straight
3		Main Axis Bent

**L = Envelope Length**  
**W = Envelope Width**  
**T = Envelope Thickness**  
 **$L > W > T$**

Ilustración 5.2. Clasificación de forja, asignación del primer dígito.

Esta clasificación divide las piezas de acuerdo con su secuencia básica de operación requerida para el proceso como ilustra la ilustración 5.3:

CLASE 0 Piezas compactas L/W ≤ 2,0 ; L/T ≤ 2,0	CLASE 1 Piezas planas L/W ≤ 2,0 ; L/T > 2,0	CLASE 2 y 3 Piezas largas L/W > 2,0
Aplanado (Buster/Scale Size) Preestampaciones (1 o 2) (La última Blocker) Estampa de acabado (Finisher) Perforado de membranas (Trimming) Eliminación de rebaba	Aplanado (Buster/Scale Size) Preestampaciones (1 o 2) (La última Blocker) Estampa de acabado (Finisher) Perforado de membranas (Trimming) Eliminación de rebaba	Aplanado (Buster/Scale Size) Distribución de material basta (Fuller) Distribución de material fina (Edger) Doblado (Bender) (Si es necesario) Preestampaciones (1 o 2) (La última Blocker) Estampa de acabado (Finisher) Perforado de membranas (Trimming) Eliminación de rebaba
<b>La complejidad aumenta con la aparición de:</b>		
Secciones delgadas Codos Depresiones laterales	Secciones delgadas Codos Depresiones laterales Nervios	Secciones delgadas Codos Nervios Grandes cambios en el área transversal

Ilustración 5.3. Tabla que muestra la secuencia básica de operaciones requeridas en función del primer dígito de la clasificación del tipo de forja.

En la ilustración 5.4 y 5.4 se muestran cómo se selecciona el segundo dígito para el criterio de clasificación de forjas tomado, según el proceso pertenezca a la clase 0-1 o 2-3.

Second Digit	Description	
0	Parting Line Flat	No Side Depressions
1	Parting Line Not Flat	
2	Parting Line Flat	Side Depressions
3	Parting Line Not Flat	

Ilustración 5.4. Asignación del segundo dígito para piezas compactas y planas.

Second Digit	Description
0	Parting Line Flat
1	Parting Line Not Flat

Ilustración 5.5 Asignación del segundo dígito para las piezas largas.

### 5.7.1. Complejidad de las Forjas.

Se van a usar dos indicaciones numéricas para describir la complejidad de la forja: el factor de complejidad de forma y el número de superficies unidas en la pieza.

El **factor de complejidad de forma** es una modificación del índice de complejidad para forjados usado en Europa:

$$F_{fc} = \frac{LWT}{V}$$

Este factor indica de manera general, la cantidad de deformación necesaria en un forjado específico, ya que la presencia de secciones finas y cambios grandes en el área de la sección transversal dan lugar a un incremento en la complejidad. Otro factor a tener en cuenta que el **número de superficies unidas** en la pieza que forman las cavidades superior e inferior. A todos los elementos estándares de superficie como son planos, cilindros, conos y demás se les da una clasificación igual, pero aquellas formas libres o elementos de superficie esculpidos se cuenta igual que cuatro superficies estándares unidos. Este número es una medida de la complejidad de la forja que indica la presencia de más elementos con forma compleja.

## 5.8. Equipos de Forja.

La forja en caliente se puede realizar por una variedad de equipos que se pueden clasificar en dos tipos básicos:

- Máquinas de carga restringida, en las que la cantidad de deformación que se puede conseguir durante cada golpe de la maquina está limitada por la energía (o fuerza) máxima disponible. Si la energía (o la fuerza) es menor que la requerida para deformar la pieza, entonces se necesitarán más de un golpe.
- Máquinas de recorrido restringido, en las que la cantidad de deformación que se puede conseguir está limitada por el golpe de la máquina. Si no es posible ejercer una fuerza suficiente con un golpe necesitaremos una máquina más grande.

Utilizar un martillo o prensa depende de un gran número de factores, pero existe unas líneas básicas para la elección:

- Los forjados circulares o con forma de anillo en acero, son particularmente adecuados para prensas de manivela hasta que las dimensiones de la forja excedan el rango de cargas de las prensas mecánicas, es entonces cuando los martillos de contragolpe se hacen necesarios.
- Las piezas forjadas asimétricas, o con bifurcaciones, tienden a producirse en martillos, ya que se requiere un área total de dado mayor que la que se encontraría disponible en prensas mecánicas de la correspondiente capacidad de carga.
- Las forjas circulares grandes se fabrican usando martillos por los grandes requerimientos de fuerza.
- Los forjados cercanos a la forma final de un álabe (o pala de hélice) tienden a realizarse usando prensas de husillo o con mayores tolerancias en martillos.
- Los forjados planos y delgados con costillas, o nervios, en los lados, junto con forjados de aleaciones ligeras se producen generalmente con prensas hidráulicas.
- Los lotes pequeños se fabrican más en martillos que en prensas.

## 5.9. Clasificación de Materiales.

Para la forja se pueden utilizar una gran variedad de materiales, pero la mayor parte de las piezas que se producen son de aleaciones de aceros y, en menor proporción, aleaciones ligeras.

El incremento en la dificultad de la forja viene representado por el incremento de las cargas requeridas y generalmente en la reducción de la vida del dado. Además a medida que el material se hace más difícil de deformar, puede ser imposible obtener secciones muy finas (nervios y membranas) y consecuentemente el producto final estará menos cercano a la forma neta. Por lo tanto, en las llamadas forjas de precisión se trabaja con materiales de aleaciones ligeras.

## 5.10. Coste de la Forja.

Los costes de los materiales suponen sobre el 50% del precio de la forja, y dentro del material, una porción considerable de esta proporción es el gasto del material en forma de rebaba, pérdidas de escala y demás. Los costes del dado representan sobre el 10% de los costes de forjado y el resto incluye el trabajo directo, los costes de operación del equipo y los gastos generales.

La ilustración 5.6. muestra el desglose de los costes promedio de forjados para forja en caliente encontrados en la industria.

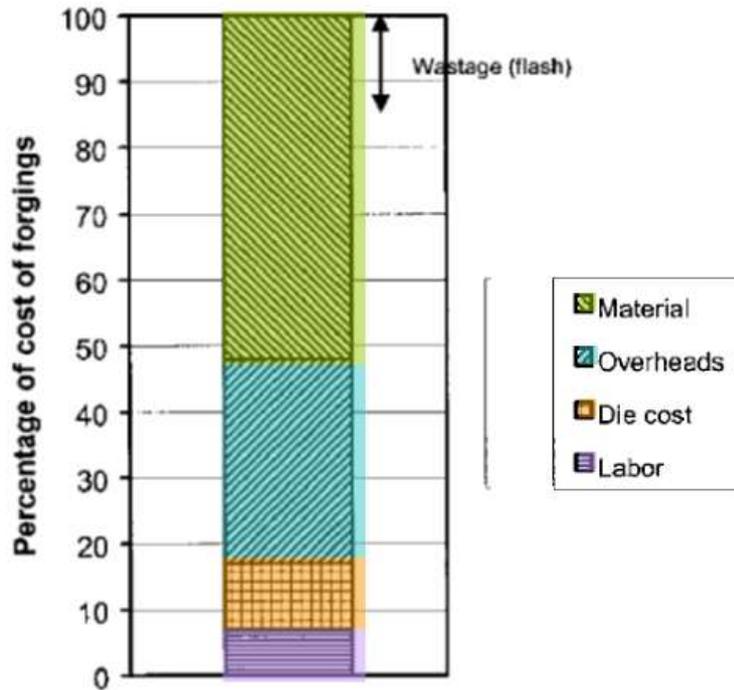


Ilustración 5.6. Desglose de los costes medios de la forja en caliente.

## 5.11. Estimación de Costes de Fabricación de una Pieza Mediante Forjado.

### 5.11.1 Cálculos Previos.

Para estimar el espesor de la rebaba  $T_f$  se ha empleado la siguiente expresión

$$T_f = 1,13 + 0,789V^{0,5} - 0,000134V = mm$$

Donde  $V$  es el volumen de la pieza forjada.

El ancho del canal de rebaba  $W_f$  se obtiene mediante la siguiente relación

$$\frac{W_f}{T_f} = 3 + 1,2e^{-0,00857} \rightarrow W_f$$

El área proyectada de la rebaba  $A_f$  se calcula multiplicando el perímetro de la pieza por el ancho del canal.

$$A_f = W_f P$$

También se puede determinar el volumen de rebaba por unidad de longitud de la línea de rebaba  $V_{fl}$

$$V_{fl} = 0,1234V^{0,5} = \frac{cm^3}{cm}$$

Y el volumen total de rebaba  $V_f = V_{fl}P = cm^3$

El espesor de la membrana  $T_w$  se puede estimar mediante la siguiente ecuación

$$T_w = 3,54A_H = mm$$

Donde  $A_H$  es el área proyectada del agujero.

El factor de exceso de material **Sst** se estima en un 5%.

Las dimensiones del dado también deberán ser estimadas para calcular posteriormente el coste del material necesario para fabricar el mismo.

En primer lugar es necesario estimar la profundidad de la cavidad  $d_c$ ,

$$d_c = 0,5T = mm$$

Donde T es el espesor de la pieza, en segundo lugar se estima el espaciado entre cavidades  $S_d$  con la siguiente expresión:

$$S_d = 3,1d_c^{0,7} = mm$$

También es necesario definir la distancia de la cavidad a los bordes  $S_e$ :

$$S_e = 3,4d_c^{0,76} = mm$$

Finalmente, la profundidad de cada dado será  $T_{blk}$ :

$$T_{blk} = 5d_c = mm$$

### 5.11.2 Coste del Material.

El coste del material para una pieza forjada se determina mediante la siguiente expresión

$$C_{mat} = C_{mp} [(V + PtV_{fl} + AHT_w) (1 + S_{sl} / 100)] = \$/pieza$$

Donde:

- $C_m$ : costes por unidad de peso del material.

- $\rho$ : densidad pieza.

### 5.11.3 Coste de Producción.

Se trata del coste de producción por una pieza y tiene en cuenta el trabajo directo y el equipo auxiliar para calentar y manejar las piezas:

$$C_{pr} = C_{op}N_{op} / N_c$$

Donde:

- $C_{op}$ : coste del equipo de forja por operación.

- $N_{op}$ : número de operaciones requeridas.

- $N_c$ : número de forjas iguales por ciclo.

Para obtener el coste del equipo de forja por operación emplea la siguiente expresión:

$$C_{op} = C_{ro} C1000$$

Donde  $C_{ro}$  es el coste relativo por operación comparado con un martinete de 1000 lb y  $C_{1000}$  es el coste de operación de un martinete de 1000 lb. El coste relativo por operación  $C_{ro}$  se obtiene de la figura 5.7 a partir de la energía requerida para el forjado.

Esta energía se calcula empleando la siguiente relación:

$$E_f = A_p \alpha_s \alpha_m = K g m$$

Donde:

- $A_p$ : área proyectada de la pieza incluyendo la rebaba.

- $\alpha_m$ : factor de carga del material.

- $\alpha_s$ : factor de forma del material.

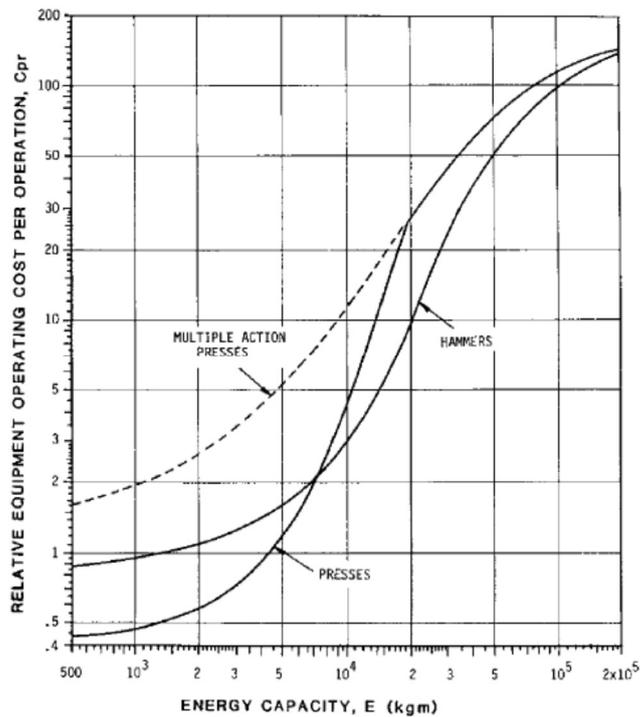


Ilustración 5.7. Coste de operación relativo por operación.

#### 5.11.4. Costes de la Puesta a Punto de la Máquina.

La prensa de forjado o el martillo tienen que ajustarse antes de comenzar a producir cada lote.

El coste de ajuste viene dado por la expresión:

$$C_{set} = T_{set} M / B_s = \$/pieza$$

Donde:

- $T_{set}$ : Tiempo de ajuste. Se puede establecer la siguiente relación entre este tiempo de ajuste y la capacidad del equipo:

$$T_{set} = 0,3925 E_f^{0,25} h$$

Con  $E_f$  definido anteriormente como la capacidad energética requerida por el equipo.

- $B_s$ : tamaño de lote.

- $M$ : Costes de operación por unidad de tiempo para un equipo concreto. Se ha asumido un valor de 85 \$/h

### 5.11.5. Costes del Dado.

#### Costes del material del dado.

Los costes del material del dado  $C_{dmat}$  vienen dados por la siguiente expresión:

$$C_{dmat} = 2C_t L_{blk} W_{blk} T_{blk} \rho_t = \$$$

Donde:

- $C$ : Coste del material por unidad de masa.

- $\rho$ : Densidad del material.

- $L_{blk}$ : Longitud del bloque de dados.

$$L_{blk} = L_{plt} + 2S_e = mm$$

- $L_{plt}$ : Longitud de la bandeja.

- $W_{bl}$ : ancho del bloque de la matriz.

$$W_{blk} = n_{edg}(D_{bar} + 19) + (N_{imp} - 1)S_d + N_{imp}W_{plt} + 2S_e + N_{fl}(D_{bar} + 19)\cos\phi_{fl}$$

- $W_{plt}$ : Ancho de la bandeja.

- $N_{imp}$ : Número de impresiones de forja.

- $T_{blk}$ : Profundidad del bloque.

También se puede calcular el volumen total de material necesario para los dados:

$$V_{die} = 2L_{blk}W_{blk}T_{blk} = m^3$$

#### Costes de fabricación de dados.

A continuación se estimará el coste de fabricación de cada dado mediante la suma del tiempo de cada proceso.

$$C_{dman} = C_{man}(T_{prep} + T_{lay} + T_{mill} + T_{bw} + T_{pt} + T_{dl} + T_{fl} + T_{edg} + T_{pol}) = \$$$

- $T_{prep}$ : Tiempo de preparación del bloque.  $T_{prep} = T_{bt} + 0,0078W_{blk}L_{blk} = h$

- $T_{lay}$ : Tiempo de diseño.

$$T_{lay} = 0,008N_c^m A_p F_{fc} S_c S_{lk} = h$$

- $N$ : Número de forjas iguales por ciclo.

- $S_c$ : Cavidad estándar.

$$S_c = 0,6(n_{sf} + n_{sf}) + 0,4(n_{sb} + n_{blk} + n_{bnd} + n_{edg} + n_{f1} + n_{f2})$$

- $S_{lk}$ : Cerradura estándar.

- $m$ : Índice de multicavidad. Se tomará el valor típico,  $m = 0.7$

- $T_{mill}$ : Tiempo de fresado.

$$T_{mill} = N_c^m A_p S_{ml} S_c S_{lk} = h$$

- $S_{ml}$ : Fresado estándar.

$$S_{ml} = K(6,45M_s)^b$$

- $M_s$ : Número de superficies por unidad de área proyectada  $M_s = \frac{N_{sp}}{A_p}$

$$K = 0,9(1 - e^{-0,0098 \text{ ave}})$$

$$b = 0,4 + 0,7e^{0,0039 \text{ ave}}$$

Donde  $d_{ave}$  es el promedio de la profundidad  $d_{ave} = \frac{V}{A_p}$

Dado que  $S_{ml} < 0.2$  se escogerá  $S_{ml} = 0.2$

-  $T_{bw}$ : Tiempo en la mesa de trabajo.

$$T_{bw} = N_c^m S_{bn} S_c S_{lk} = h$$

-  $S_{bn}$ : es el estándar para la mesa de trabajo que depende de la complejidad de la forja y la profundidad promedio de la cavidad.  $S_{bn} = B_0 + 0.26 (F_{ins} - 15)$

-  $F_{ins}$ : Factor del banco de trabajo.

$$F_{ins} = A_p 6.54 + 0.5 N_s$$

-  $B_0$ : Dicha constante depende de la profundidad promedio:

$$\begin{cases} d_{ave} \leq 12.7 \text{ mm} \rightarrow B_0 = 0.056 d_{ave} \\ d_{ave} > 22.86 \text{ mm} \rightarrow B_0 = 4.5 + (0.04 d_{ave} - 0.9) 2.19 \\ 12.7 < d_{ave} \leq 22.86 \text{ mm} \rightarrow B_0 = 0.5 + (0.04 d_{ave} - 0.35) 7.27 \end{cases}$$

-  $T_{pl}$ : Tiempo planificación.  $T_{pl} = 0.008 T_{cav}^{0.5} = h$

$$T_{cav} = T_{lay} + T_{mill} + T_{bw} = h$$

-  $T_{edg}$ : Tiempo de distribución.

$$T_{edg} = n_{edg} L (D_{bar} / 25.4 + 1) 0.005 = h$$

Donde  $D_{bar}$  es el diámetro de barra equivalente:  $D_{bar} = \left( \frac{4 d_{ave} W_{plt}}{\pi} \right)^{0.5}$

-  $T_{pol}$ : Tiempo de acabado final.  $T_{pol} = N_c [1 + (F_{fc} - 1) 0.6] = h$

-  $T_{fl}$ : Tiempo para el canal de rebaba.  $T_{fl} = \left( \frac{N_c P_r}{635} \right) = h$

Donde  $P_r$  es el perímetro exterior de la forja. No obstante se tomará  $T_{fl} = 0.8$  ya que el valor obtenido es menor que 0.8.

Por lo tanto los costes iniciales de fabricación del molde son  $C_{DIE} = C_{dmat} + C_{dman} = \$$

### 5.11.6 Vida del Dado y Costes del Cambio de Herramientas.

La vida del dado utilizado para la forja es relativamente corto, por tanto es necesario incluir en la evaluación del proceso la vida del dado y la necesidad del cambio de herramientas.

La cantidad de piezas producidas entre reparaciones de la matriz vendrá dada por:

$$Q_{rs} = Q_{rb} \beta_s \beta_m = \text{piezas}$$

Donde:

-  $Q_{rb}$ : Cantidad de piezas que se pueden conformar con el molde hasta que se necesite una reparación. Se supondrá un valor de 40000 piezas.

-  $\beta_m$ : Factor de vida de la matriz.

-  $\beta_s$ : Factor de complejidad de forma.

La vida total será:

$$L_D = (N_{rs} + 1) Q_{rs} N_c = \text{piezas}$$

Donde

- $N_{rs}$ : Número de reparaciones posibles. Se ha supuesto que un valor de 5 reparaciones.

- $N_c$ : Número de forjas por ciclo.

El coste de cada reparación  $C_{rs}$  será:

$$C_{rs} = C_{man} [0.9(T_{mill} + T_{bw} + T_{fl}) + T_{pol}] = \$$$

Finalmente el coste del dado por pieza es

$$C_D = C_{DIE} + n_{rs} C_{rs} Q_{lv} = \$/pieza$$

Donde se ha tenido en cuenta la vida de la matriz es inferior al lote que se desea fabricar. El número de reparaciones requeridas  $n_{rs}$  en este caso es:

$$n_{rs} = Q_{lv} / Q_{rs} N_c = \text{reparaciones}$$

### 5.11.7. Costes de la Eliminación de la Rebaba.

Para estimar el coste de la máquina que realizará la eliminación de la rebaba es necesario conocer en primer lugar cual es la fuerza que se necesitará:

$$F_{trm} = (T_f P_t + T_w P_w) 1.15 = N$$

Donde:

- $P_w$ : Perímetro del agujero.

- $T_f$ : Espesor de la rebaba.

- $N_c$ : Número de forjados por ciclo.

- $P_f$ : Perímetro de la rebaba.

- $T_w$ : Espesor del agujero.

- $Y_c$ : Módulo de cizalla equivalente. Se tomará el 70% del UTS del material aunque se debe tener en cuenta que dicho valor puede variar en función de la temperatura de corte. Conviene destacar que el término 1.15 se corresponde con un factor de seguridad del 15%.

De manera que una vez conocida la fuerza necesaria se calcula la energía como:

$$E_f = 0.096 F_{trm}^{0.5} = kg\ m$$

### 5.11.8. Costes de las Herramientas.

A continuación se estimará el coste de las herramientas necesarias para eliminar la rebaba, es decir el coste del punzón y del dado de corte.

En primer lugar se estimará el material necesario para el dado de recorte:

$$V_{trd} = 1.2 L_{plt} W_{plt} T / 2 = cm^3$$

Y para el punzón:

$$V_{trp} = L_{plt} W_{plt} T = cm^3$$

Donde los parámetros,  $W_{plt}$  y  $T$  ya se han definido y calculado anteriormente.

Por lo tanto, el coste del material del punzón y del dado de recorte será:

$$C_{trm} = (V_{trd} + V_{trp})\rho_t C_t = \$$$

A continuación se calculará el tiempo necesario para fabricar el dado de recorte:

$$T_{rd} = T_{int} + (A_0 + M_p A_{tb} + T_{lk}) N_c = h$$

Donde:

-  $T_{int}$ : Tiempo de inicio del proceso.

-  $A_0$ : Tiempo base.

-  $M_p$ : Factor de área del bloque.

-  $A_{tb}$ : Área del bloque del molde.

-  $T_{lk}$ : Tiempo añadido para moldes bloqueados. Si el molde no está bloqueado  $T_{lk} = 0$ .

$$F_c = Pr / 2(\pi A_p)^{0,5}$$

El número de horas requeridas para la fabricación del punzón se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$T_{tp} = (0.004A_{pb} + 0.33) + 0.05 + [A_{pb} - A_p N_c 6.56] + [P_r - P_w 2.54 + 14F_c - 13] N_c F_{lck} + 0.005 N_c A_p F_{fc}$$

Donde  $A_{pb}$  es el área del punzón que viene dada por:  $A_{pb} = L_{plt} W_{plt} = cm^2$

Finalmente el coste total inicial de las herramientas es:

$$C_{trim} = (T_{td} + T_{tp}) C_{man} + C_{trm}$$

La vida de la herramienta es:

$$L_{trm} = L_{tbas} \beta_m N_c = piezas$$

Donde  $L_{tbas}$  es un parámetro que al igual que  $Q_{rb}$ , indica el número de piezas que se pueden recortar hasta que se necesite un reemplazo de la herramienta. Se supondrá un valor de 40000 piezas como se realizó con  $Q_{rb}$ .

Por lo tanto el coste por pieza será  $\frac{C_{trim}}{L_{trim}} = \$/pieza$

### 5.11.9 Coste Final de la Pieza.

$$C_{total} = C_{mat} + C_{pr} + C_{set} + C_{dmat} + C_{DIE} + C_D$$

# 6. MANUAL DE USO DE LOS PROGRAMAS.

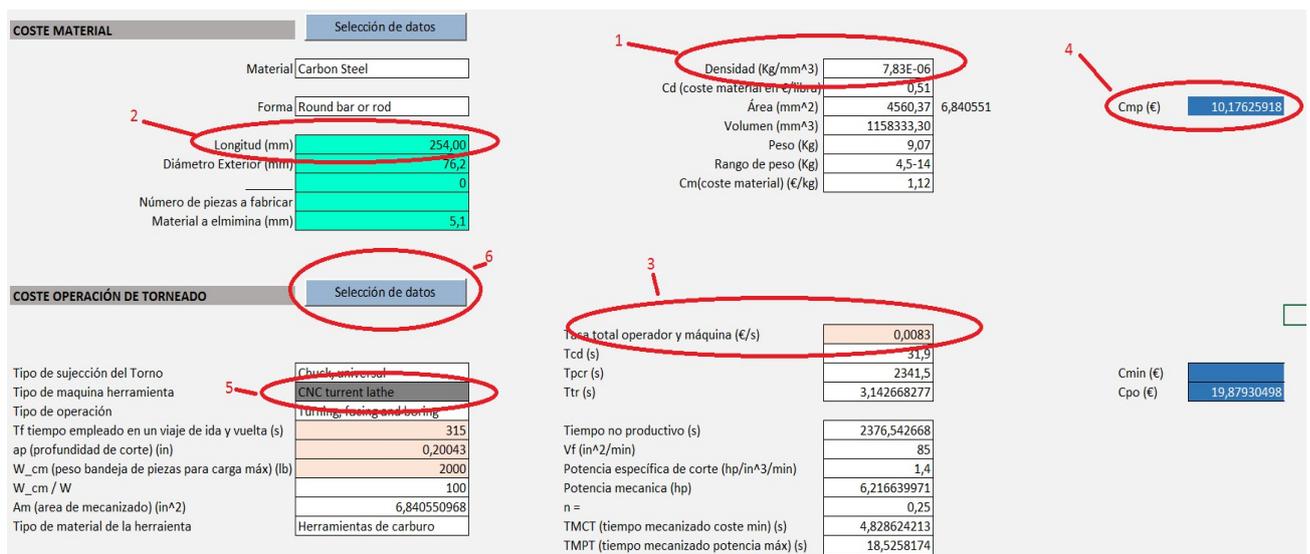
## 6.1 Introducción.

En este capítulo se describe cómo utilizar cada programa de cálculo, que datos hay que proporcionar como entrada, que datos han sido estimados con antelación y que datos se obtienen como salida.

Todas las tablas y gráficos de las cuales se ha hecho uso para la programación se pueden consultar en los anexos A, B y C.

De forma general para los tres programas se tiene que:

Al abrir el fichero de Excel  de cualquiera de ellos, nos encontramos con la siguiente estructura:



**COSTE MATERIAL**

Selección de datos

Material: Carbon Steel

Forma: Round bar or rod

Longitud (mm): 254,00

Diámetro Exterior (mm): 76,2

Número de piezas a fabricar: 0

Material a elimina (mm): 5,1

Densidad (Kg/mm<sup>3</sup>): 7,83E-06

Cd (coste material en €/litro): 0,51

Área (mm<sup>2</sup>): 4560,37

Volumen (mm<sup>3</sup>): 1158333,30

Peso (Kg): 9,07

Rango de peso (Kg): 4,5-14

Cm(coste material) (€/kg): 1,12

Cmp (€): 10,17625918

**COSTE OPERACIÓN DE TORNEADO**

Selección de datos

Tipo de sujeción del Torno: Chuck, universal

Tipo de maquina herramienta: CNC turret lathe

Tipo de operación: Turning, facing and boring

Tf tiempo empleado en un viaje de ida y vuelta (s): 315

ap (profundidad de corte) (in): 0,20043

W\_cm (peso bandeja de piezas para carga máx) (lb): 2000

W\_cm / W: 100

Am (area de mecanizado) (in<sup>2</sup>): 6,840550968

Tipo de material de la herramienta: Herramientas de carburo

Tasa total operador y máquina (€/s): 0,0083

Tcd (s): 31,9

Tpccr (s): 2341,5

Ttr (s): 3,142668277

Cmin (€):

Cpo (€): 19,87930498

Tiempo no productivo (s): 2376,542668

Vf (in<sup>2</sup>/min): 85

Potencia específica de corte (hp/in<sup>3</sup>/min): 1,4

Potencia mecánica (hp): 6,216639971

n =: 0,25

TMCT (tiempo mecanizado coste min) (s): 4,828624213

TMPT (tiempo mecanizado potencia máx) (s): 18,5258174

Ilustración 6.1.1 Hoja de cálculo general de un programa.

En la ilustración 6.1.1, se puede observar que hay celdas en diferentes colores:

- 1.- Las celdas en color blanco **no se pueden modificar**, ya que contienen datos que provienen de formularios en los cuales se ha hecho una elección previa, datos directos de tablas o datos resultados de operaciones de otras celdas.
- 2.- Las celdas de color azul celeste, son celdas que se han de **rellenar obligatoriamente** con datos de entrada.
- 3.- Las celdas de color rosado **pueden ser modificadas** ya que contienen datos estimados y si el usuario quiere ser más preciso, puede cambiarlos. Si se pincha sobre cualquiera de estas celdas aparecerá una nota que hace referencia a la procedencia del valor estimado, como se puede visualizar en la ilustración 6.1.2.

Cd (coste material en €/libra)	0,51	6,840551	Cmp (€)	10,17625918
Área (mm <sup>2</sup> )	4560,37			
Volumen (mm <sup>3</sup> )	1158333,30			
Peso (Kg)	9,07			
Rango de peso (Kg)	4,5-14			
Cm(coste material) (€/kg)	1,12			
<b>click</b> ↓				
Tasa total operador y máquina (€/s)	0,0083			
Tcd (s)	31,9			
Tpcr (s)	2341,5		Cmin (€)	
Ttr (s)	3,142668277		Cpo (€)	19,87930498
<b>DATO ESTIMADO</b> La estimación de este dato viene dada en la ref [1], capítulo 7, pág 293.				
Tiempo no productivo (s)	2376,542668			
Vf (in <sup>2</sup> /min)	85			
Potencia específica de corte (hp/in <sup>3</sup> /min)	1,4			
Potencia mecánica (hp)	6,216639971			
n =	0,25			
TMCT (tiempo mecanizado coste min) (s)	4,828624213			
TMPT (tiempo mecanizado potencia máx) (s)	18,5258174			

Ilustración 6.1.2 Ejemplo de nota informativa al pinchar una celda de color rosado.

4.- Las celdas de color azul oscuro **no se pueden modificar** ya que son celdas de datos parciales de salida, es decir contienen resultados fragmentados cuya unión llevarán al resultado final.

5.- Las celdas de color gris oscuro son celdas que **no se pueden modificar**, se rellenan automáticamente desde Visual Basic.

6.- Los **botones de selección de datos son de obligatoria pulsación**, y aparecerá un formulario como el que se muestra en la ilustración 6.1.3:

**COSTE MATERIAL**

Selección de datos

Material

Forma

Longitud (mm)

Diámetro Exterior (mm)

Número de piezas a fabricar

Material a eliminar (mm)

Selección de datos

**COSTE OPERACIÓN DE TORNEADO**

Selección de datos

Tipo de sujeción del Torno

Tipo de maquina herramienta

Tipo de operación

Tf tiempo empleado en un viaje de ida y vuelta (s)

ap (profundidad de corte) (in)

W\_cm (peso bandeja de piezas para carga máx) (lb)

W\_cm / W

Am (area de mecanizado) (in<sup>2</sup>)

Tipo de material de la herramienta

Tasa total operador y máquina (€/s)

Tcd (s)

Tpcr (s)

Ttr (s)

Tiempo no productivo (s)

Vf (in<sup>2</sup>/min)

Potencia específica de corte (hp/in<sup>3</sup>/min)

Potencia mecánica (hp)

n =

TMCT (tiempo mecanizado coste min) (s)

TMPT (tiempo mecanizado potencia máx) (s)

**Selección de datos**

**Tipo de material**

**Forma**

Ilustración 6.1.3. Ejemplo de botón "Selección de datos".

Selección de datos

**Tipo de maquina herramienta**

CNC turrent lathe

**Seleccion fijacion de la maquina.**

Chuck, universal

Chuck, universal

Chuck, independent (4 jaws)

Clamp on table (3 clamps)

Collet

Faceplate (3 clamps)

Fixture, horizontal (3 screws)

Fixture, vertical (3 screws)

Hand-held

ACEPTAR CANCELAR

Ilustración 6.1.4. Ejemplo de formulario.

En el formulario se tiene que seleccionar la opción deseada, entre las que se muestran en los diferentes desplegables como se observa en la ilustración 6.1.4, y pulsar el botón de aceptar. En el caso de que algún campo quede vacío al pulsar el botón de aceptar, aparecerá un mensaje que advierte que se deben rellenar todos los campos antes de aceptar, como el que se contempla en la ilustración 6.1.5.

Selección de datos

**Tipo de maquina herramienta**

CNC turrent lathe

**Seleccion fijacion de la maquina.**

Clamp on table

**Tipo de operaci**

**Tipo de materia**

ACEPTAR CANCELAR

Error

Debe introducir todos los datos antes de continuar

Aceptar

3)	7,83E-06
ra)	0,51
2)	4560,37
3)	1158333,30
(g)	9,07
(g)	4,5-14
v)	1,13

6,840550968	n =	3,142008277
de carburo	TMCT (tiempo mecanizado coste min) (s)	2376,542668
		85
		1,4
		6,216639971
		0,25
		4,828624213

Ilustración 6.1.5. Ejemplo de la advertencia de un formulario incompleto.

También se pueden encontrar botones que corren macros, **son de obligatoria pulsación** y tienen un aspecto como el que se puede ver en la ilustración 6.1.6.

Coste de operación típico(\$/h) (tabla mold	30	NÚMERO DE Diposición de Diposición de Nuevo largo Nuevo anchc Nueva área t Nuevo coste
Índe multicavidad	0,7	
m1 (\$/h/KW)	0,009	
____Dimensiones del molde____ con una única cavidad		
Largo(cm)	35,1	
Ancho(cm)	20,46	
Espesor	18	
Área base del molde (cm^2)	718,146	
Coste base del molde para una cavidad (\$)	2026,914442	
Largo cavidad(cm)		
Ancho cavidad(cm)		
<b>Comprobación máquina inyectora</b>		
Fuerza máx separación real	620,4	TIEMPO CICL TIEMPO CICL
Vale la inyectora anteriormente escogida	No	
Pi(KW)	18,5	
Td(s)	3,3	
K1(\$/h) (coste operación típico)	33	
Área proyectada total( n cavidades)	120	
Capacidad de llenado (cm^3)	36	
Tf	2,3	
Ttr	3,3	

Ilustración 6.1.6. Ejemplo de botón que corre una macro.

Y por último el coste total estimado de un proceso determinado, se muestra en una celda de color verde como se muestra en la ilustración 6.1.7.

ti (s)	121,6891183	Cp (€)	#D
t máx (s)	17,64028795		
<b>Coste total(€) 96,6431</b>			

Ilustración 6.1.7 Ejemplo de una celda que contiene el coste final de un determinado tipo de operación.

## 6.2 Manual de Uso del Programa de Mecanizado.

Para la estimación de los costes de fabricación mediante un proceso de mecanizado, se tienen que seguir los siguientes pasos:

- 1.- Abrir el Excel  “Proceso de mecanizado”.
- 2.- Pinchar sobre el primer botón de “Selección de datos” y elegir el tipo de material con el que se quiere fabricar y el tipo de forma base sobre el cual se va a trabajar.
- 3.- Datos a ingresar:
  - Datos relativos a la dimensión de la pieza.
  - Número de piezas que se quieren fabricar.
  - Dimensiones relativas al material a eliminar.
- 4.- Pinchar sobre el botón de “Selección de datos” de coste de operación de torneado, y seleccionar en el formulario el tipo de máquina herramienta, el tipo de sujeción de la máquina, el tipo de operación y el tipo de material de la herramienta.
- 5.- Pinchar sobre el botón de “Selección de datos” de coste de operación de fresado, y seleccionar en el formulario el tipo de máquina herramienta, el tipo de sujeción de la máquina, el tipo de operación y el tipo de material de la herramienta.
- 6.- Pinchar sobre el botón de “Selección de datos” de coste de operación de torneado, y seleccionar en el formulario el tipo de máquina herramienta y el tipo de operación que se va a realizar.

Todos los cálculos para el coste estimativo de la fabricación de una pieza se realizaran automáticamente, proporcionando como resultado los costes parciales de las operaciones de torneado, fresado y rectificado, el coste del material y por último el coste final de fabricación de la pieza.

### 6.2.1. Valores Estimados Inicialmente (Mecanizado).

Todos los valores estimados se han encontrado en el capítulo 7 del libro “MANUFACTURING ENGINEERING AND MATERIALS PROCESSING”.

- M: coste de operación por unidad de tiempo. Este valor se ha estimado en 0,0083 €/s en la página 293.
- Tf: tiempo empleado en un viaje de ida y vuelta. Valor estimado en 315 s en la página 319.
- W\_cm: peso bandeja de piezas para carga máxima. Valor estimado en 2000 lb en la página 318.
- W\_t: anchura disco de desbaste. Valor estimado en 1 in en la página 326.

## 6.3 Manual de Uso del Programa de Moldeo por Inyección de Plásticos.

Para la estimación de los costes de fabricación mediante un proceso de moldeo por inyección de plásticos, se tienen que seguir los siguientes pasos:

- 1.- Abrir el Excel  “Proceso de moldeo por inyección de plásticos”.
- 2.- Pinchar sobre el primer botón de “Selección de datos” y elegir el tipo de material y si existen o no orificios proyectados en la pieza.

### 3.- Datos a ingresar:

- Datos relativos a la dimensión de la pieza.
- Número de piezas que se quieren fabricar.
- Área proyectada de la pieza.
- Part volumen.
- Área total de los orificios proyectados.
- Número de segmentos de superficies interiores.
- Número de segmentos de superficies exteriores.
- Datos referidos a las dimensiones de la cavidad del molde.
- Disposición de las cavidades a lo largo y a lo ancho.

4.- Pinchar sobre el botón de “Selección de datos costes adicionales”, y seleccionar en el formulario el tipo de apariencia final, nivel de tolerancia, planos de inclinación, tipos de machos y textura requerida.

5.-Por último es necesario pinchar sobre el botón “comprobación maquina inyectora”.

Todos los cálculos para el coste estimativo de la fabricación de una pieza se realizaran automáticamente, proporcionando como resultado los costes parciales del coste del material, coste del molde, coste del proceso y por último el coste final de fabricación de la pieza.

#### 6.3.1. Valores Estimados Inicialmente (Inyección de Plásticos).

Todos los valores estimados se han encontrado en el capítulo 8 del libro “MANUFACTURING ENGINEERING AND MATERIALS PROCESSING”.

- Coste costo de fabricación del molde, estimado en 40 €/h en la página 369.
- Ts: tiempo de secado. Valor estimado en 2s.
- m: índice multicavidad estimado en 0,07 en la página 371.
- m1: constante de la máquina inyectora. Valor estimado en 0,09 en la página 371.

## 6.4 Manual de Uso del Programa de Moldeo mediante Forjado.

Para la estimación de los costes de fabricación por un proceso de moldeo mediante forjado, se tienen que seguir los siguientes pasos:

- 1.- Abrir el Excel  “Proceso de moldeo mediante forjado”.
- 2.- Pinchar sobre el primer botón de “Selección de datos” y elegir el tipo de material de la pieza, material del molde, líneas de partición del molde y tipo de ajuste de la pieza.
- 3.- Datos a ingresar:
  - Datos relativos a la dimensión de la pieza.
  - Número de piezas que se quieren fabricar.
  - Tamaño del lote
  - Área proyectada de la pieza.

- Volumen de la pieza
  - Área proyectada de los orificios.
  - Perímetro de los orificios.
  - Número de forjas iguales por ciclo.
  - Número de superficies.
- 4.- Pinchar sobre el botón de “Clase (primera cifra)”.

5	Nsp (número de superficies)	7
6	Perímetro del agujero(cm)	0
7	<b>Tipo y complejidad de la forja</b>	
8	L/W	1
9	L/T	5
10	Línea de partición de los moldes	Parting line Flat, side depressions
11	Clase (primera cifra)	CLASE 1
12	Clase (segunda cifra)	2
13	Clase obtenida en las dos casillas anteriores	1_2
14	Ffc	4,01
15	Rango Ffc	3_6
16		1_4

Ilustración 6.4.1 Botón “Clase (primera cifra)”.

Todos los cálculos para el coste estimativo de la fabricación de una pieza se realizarán automáticamente, proporcionando como resultado los costes parciales del coste del material, coste del molde, coste del proceso y por último el coste final de fabricación de la pieza.

#### 6.4.1. Valores Estimados Inicialmente (Forjado).

Todos los valores estimados se han encontrado en el capítulo 14 del libro “MANUFACTURING ENGINEERING AND MATERIALS PROCESSING”.

- M: coste de operación por unidad de tiempo. Este valor se ha estimado en 85\$/h en la página 631.
- m: índice multicavidad. Valor estimado en 0,7 en la página 634.
- $S_{st}$ : factor de exceso de material estimado en un 5% en la página 624.
- $Q_{rb}$ : Cantidad de piezas que se pueden conformar con el molde hasta que se necesite una reparación. Se ha supuesto un valor de 40000 piezas como se indica en la página 637.
- $N_{rs}$ : Número de reparaciones posibles. Se ha supuesto que un valor de 5 reparaciones como se indica en la página 637.
- En la estimación de la vida del punzón y el dado de corte se ha definido el parámetro  $L_{tbas}$  que, de forma similar a  $Q_{rb}$ , indica el número de piezas que se pueden recortar hasta que se necesite un reemplazo de la herramienta. Se supondrá un valor de 40000 piezas como se realizó con  $Q_{rb}$ . (página 640).
- $\Psi_{fl}$ : 15° en la página 633.
- $S_{ik}$ : cerradura estándar. Valor estimado en 1 en la página 634.
- $C_{man}$ : tasa de coste de fabricación, estimada en 45€/h en la página 636.
- $C_{1000}$ : costo de procesamiento por operación para un martillo de 1000 lb, estimado en 0,15 \$, en la página 631.

# 7. CÓDIGOS VBA USADOS EN CADA PROGRAMA.

---

## 7.1 Introducción.

Visual Basic es un lenguaje de programación dirigido por eventos, desarrollado por Alan Cooper para Microsoft. Este lenguaje de programación es un dialecto de BASIC, con importantes agregados. Su principal función es la de simplificar la programación utilizando un ambiente de desarrollo que facilita en cierta medida la programación misma.

## 7.2 Códigos Usados en la Programación de la Estimación de Costes Mediante un Proceso de Mecanizado.

Con la siguiente función se calcula el rango en el cual está un dato dado en una celda.

```
Function Calcular_Rango() As String
  Select Case Range ("F8")
    Case Is < 0.2
      Calcular_Rango = "0-0,2"
      Exit Function
    Case Is < 4.5
      Calcular_Rango = "0,2-4,5"
      Exit Function
    Case Is < 14
      Calcular_Rango = "4,5-14"
      Exit Function
    Case Is < 27
      Calcular_Rango = "14-27"
      Exit Function
    Case Else
      Calcular_Rango = "Peso Excesivo"
  End Select
End Function
```

Con esta parte del código se busca un dato de una tabla en función de dos datos de entrada

```
Private Sub Worksheet_SelectionChange(ByVal Target As Range)

Sheet1.Cells(20, 11) = ""
Sheet1.Cells(21, 11) = ""
Sheet1.Cells(36, 11) = ""
Sheet1.Cells(37, 11) = ""

    If Target.Address = "SCS4" Or Target.Address = "SCS6" Or Target.Address = "SCS8" Or Target.Address =
"SCS9" Or Target.Address = "SCS10" Then
        Range("F9") = Calcular_Rango
    End If

    Dim fila As Integer
    fila = 9

    Do While Sheet4.Cells(fila, 1) <> ""
        fila = fila + 1
    Loop

    For i = 9 To fila - 1
        For j = 2 To 5

            If Sheet4.Cells(i, 1) = Sheet1.Cells(20, 3) And Sheet4.Cells(6, j) = Sheet1.Cells(9, 6) Then
                Sheet1.Cells(19, 6) = Sheet4.Cells(i, j)
            End If
        Next j
    Next i

End Sub
```

Ahora se muestra como se toma el valor de una celda u otra en función de la comparación de otras dos celdas

```
tmct = Sheet1.Cells(28, 6) 'Tiempo de mecanizado a coste mínimo
tmpt = Sheet1.Cells(29, 6) 'Tiempo de mecanizado a potencia máxima

If tmct > tmpt Then
    Sheet1.Cells(20, 11) = Sheet1.Cells(20, 12)
Else
    Sheet1.Cells(20, 11) = ""
    Sheet1.Cells(21, 11) = Sheet1.Cells(21, 12)
End If

tmcf = Sheet1.Cells(46, 6) 'Tiempo de fresado a coste mínimo
tmpf = Sheet1.Cells(47, 6) 'Tiempo de fresado a potencia máxima

If tmcf > tmpf Then
    Sheet1.Cells(36, 11) = Sheet1.Cells(36, 12)
Else
    Sheet1.Cells(37, 11) = Sheet1.Cells(37, 12)
End If

tgc = Sheet1.Cells(57, 6) 'Tiempo de rectificado a coste mínimo
tgp = Sheet1.Cells(58, 6) 'Tiempo de rectificado a potencia máxima

If tgc > tgp Then
    Sheet1.Cells(55, 11) = Sheet1.Cells(55, 12)
Else
    Sheet1.Cells(57, 11) = Sheet1.Cells(57, 12)
End If

End Sub
```

Activación de los botones que muestran los formularios:

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
    UserForm1.Show  
End Sub  
  
Private Sub CommandButton2_Click()  
    UserForm2.Show  
End Sub  
  
Private Sub CommandButton3_Click()  
    UserForm3.Show  
End Sub  
  
Private Sub CommandButton4_Click()  
    UserForm4.Show  
End Sub
```

### Userform1

Todos los cuadros combinados funcionan de igual manera, contienen según se requiera un número determinado de desplegados en los cuales se introducen la lista de datos a elegir. Llevan dos botones, uno de aceptar, que al tocarlo sin haber cubierto todos los campos requerido, lanzará un mensaje de advertencia para que todos los campos sean debidamente cumplimentados y otro para cancelar y salir del cuadro.

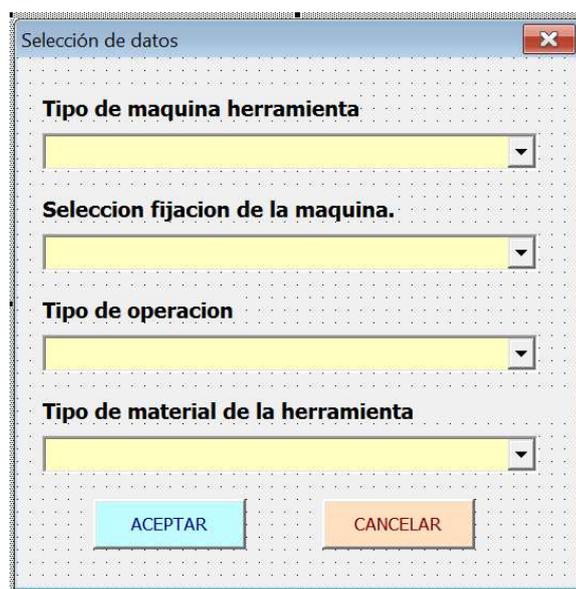


Ilustración 7.2.1. Ejemplo formulario.

**User form1**

```

If Me.ComboBox1 <> "" And Me.ComboBox5 <> "" And Me.ComboBox4 <> "" And
Me.ComboBox3 <> "" Then
    Sheet1.Cells(21, 3) = Me.ComboBox1
    Sheet1.Cells(20, 3) = Me.ComboBox5
    Sheet1.Cells(22, 3) = Me.ComboBox3
    Sheet1.Cells(28, 3) = Me.ComboBox4
    Unload Me
    Sheet1.Activate
    Range("a1").Select
Else
    MsgBox "Debe introducir todos los datos antes de continuar", vbOKOnly + vbExclamation, "Error"
End If
End Sub

Private Sub CommandButton2_Click() 'Boton salir
    Unload Me
End Sub

Private Sub Label4_Click()
End Sub

Private Sub UserForm_Initialize()
For i = 9 To 25
Me.ComboBox5.AddItem Sheet4.Cells(i, 1)
Next i
For j = 8 To 10
Me.ComboBox1.AddItem Sheet5.Cells(j, 1)
Next j
For h = 26 To 27
Me.ComboBox3.AddItem Sheet7.Cells(h, 4)
Next h
For k = 26 To 28
Me.ComboBox4.AddItem Sheet7.Cells(k, 1)
Next k
End Sub

```

## Userform2

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
    If Me.ComboBox1 <> "" And Me.ComboBox5 <> "" And Me.ComboBox4 <> "" And Me.ComboBox3  
<> "" Then  
        Sheet1.Cells(39, 3) = Me.ComboBox1  
        Sheet1.Cells(38, 3) = Me.ComboBox5  
        Sheet1.Cells(40, 3) = Me.ComboBox3  
        Sheet1.Cells(46, 3) = Me.ComboBox4  
        Unload Me  
        Sheet1.Activate  
    Else  
        MsgBox "Debe introducir todos los datos antes de continuar", vbOKOnly + vbExclamation, "Error"  
    End If  
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()  
    Unload Me  
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()  
    For i = 9 To 25  
        Me.ComboBox5.AddItem Sheet4.Cells(i, 1)  
    Next i  
    For j = 10 To 11  
        Me.ComboBox1.AddItem Sheet5.Cells(j, 1)  
    Next j  
    For h = 20 To 20  
        Me.ComboBox3.AddItem Sheet8.Cells(h, 1)  
    Next h  
    For k = 21 To 24  
        Me.ComboBox4.AddItem Sheet8.Cells(k, 1)  
    Next k  
End Sub
```

**User form3**

```
Private Sub Label1_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Click()
```

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
If Me.ComboBox1 <> "" And Me.ComboBox5 <> "" Then
```

```
Sheet1.Cells(4, 3) = Me.ComboBox1
```

```
Sheet1.Cells(6, 3) = Me.ComboBox5
```

```
Unload Me
```

```
Sheet1.Activate
```

```
Else
```

```
MsgBox "Debe introducir todos los datos antes de continuar", vbOKOnly + vbExclamation,  
"Error"
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
Unload Me
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
```

```
For i = 7 To 16
```

```
Me.ComboBox1.AddItem Sheet3.Cells(i, 3)
```

```
Next i
```

```
For j = 6 To 12
```

```
Me.ComboBox5.AddItem Sheet2.Cells(j, 2)
```

```
Next j
```

```
End Sub
```

## User form 4

```
Private Sub UserForm_Click()
```

```
End Sub
```

'Boton aceptar

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
    If Me.ComboBox5 <> "" And Me.ComboBox6 <> "" Then
```

```
        Sheet1.Cells(56, 3) = Me.ComboBox5
```

```
        Sheet1.Cells(57, 3) = Me.ComboBox6
```

```
        Unload Me
```

```
        Sheet1.Activate
```

```
        Range("a1").Select
```

```
    Else
```

```
        MsgBox "Debe introducir todos los datos antes de continuar", vbOKOnly + vbExclamation, "Error"
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

'Boton salir

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
    Unload Me
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Label4_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
```

```
    For i = 6 To 7
```

```
        Me.ComboBox5.AddItem Sheet6.Cells(i, 1)
```

```
    Next i
```

```
    For j = 21 To 22
```

```
        Me.ComboBox6.AddItem Sheet9.Cells(j, 1)
```

```
    Next j
```

```
End Sub
```

### 7.3 Códigos Usados en la Programación de la Estimación de costes Mediante un Proceso de Moldeo por Inyección de Plásticos.

En esta parte del código se comparan los valores de tres celadas con los de tres columnas de una tabla, quedando se con la fila que cumpla todas las condiciones, y devolviendo el valor de otras variables de otras columnas y la fila seleccionada.

```
Private Sub Worksheet_Change(ByVal Target As Range)
Fuerzamáx = Sheet1.Cells(46, 4)
Capacidaddellenado = Sheet1.Cells(47, 4)
Carreradevacio = Sheet1.Cells(48, 4)
'Potenciadeaccionamiento = Sheet1.Cells(42, 7)
  For I = 15 To 21
    If Fuerzamáx <= Sheet3.Cells(I, 2) And Capacidaddellenado <= Sheet3.Cells(I, 3) And
Carreradevacio <= Sheet3.Cells(I, 6) Then
      Sheet1.Cells(42, 7) = Sheet3.Cells(I, 7)
      'Sheet1.Cells(42, 8) = Sheet3.Cells(I, 2)
    Exit For
  End If
Next I
End Sub
```

Función interpola, devuelve un valor, introduciéndole como datos de entrada el vector de valores de un tabla en x, el vector en y el valor del que se quiere obtener el valor interpolado.

```
Function interpola(vx, vy, x)
'vx = vector de valores de x de la tabla
'vy = idem y
'x = valor de la x para el que se desea interpolar
If x <= vx(1) Then
  interpola = vy(1)
ElseIf x >= vx(7) Then
  interpola = vy(7)
Else
  For I = 2 To N
    If x > vx(I - 1) And x <= vx(I) Then
      interpola = vy(I - 1) + (vy(I) - vy(I - 1)) / (vx(I) - vx(I - 1)) * (x - vx(I - 1))
    End If
  Next I
End If
End Function
```

## Botones de activación de los cuadros combinados

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
    UserForm1.Show  
End Sub  
Private Sub CommandButton2_Click()  
    UserForm2.Show  
End Sub
```

Ahora se compara el valor de una celda con otra y en función de esta comparación volverá no a comparar los valores de tres celdas con los de tres columnas de una tabla, quedando se con la fila que cumpla todas las condiciones, y devolviendo el valor de otras variables de otras columnas y la fila seleccionada.

```
Sub calculo()  
    Dim dato As Integer  
    dato = Sheet1.Cells(42, 8)  
    Sheet1.Cells(77, 4) = ""  
    Fuerzamáxreal = Sheet1.Cells(75, 4)  
    Capacidaddellenado = Sheet1.Cells(47, 4)  
    Carreradevacio = Sheet1.Cells(48, 4)  
    'Potenciadeaccionamiento = Sheet1.Cells(77, 4)  
    'If Sheet1.Cells(76, 4) = "No" Then  
    For j = 15 To 21  
  
        If Fuerzamáxreal <= dato Then  
            Sheet1.Cells(76, 4) = "si"  
            Sheet1.Cells(77, 4) = Sheet1.Cells(42, 7)  
        Exit For  
  
        ElseIf Fuerzamáxreal <= Sheet3.Cells(j, 2) And Capacidaddellenado <=  
Sheet3.Cells(j, 3) And Carreradevacio <= Sheet3.Cells(j, 6) Then  
            Sheet1.Cells(77, 4) = Sheet3.Cells(j, 7)  
            Sheet1.Cells(76, 4) = "No"  
        Exit For  
    End If  
Next j  
End Sub
```

**Userform1**

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
Sheet1.Cells(8, 4) = Me.ComboBox1  
Sheet1.Cells(13, 4) = Me.ComboBox5  
Unload Me  
Sheet1.Activate  
Range("a1").Select  
  
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()  
Unload Me  
End Sub
```

```
Private Sub Label4_Click()  
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()  
For I = 34 To 35  
Me.ComboBox5.AddItem Sheet2.Cells(I, 1)  
Next I  
For j = 7 To 17  
Me.ComboBox1.AddItem Sheet2.Cells(j, 1)  
Next j  
End Sub
```

## Userform2

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
Sheet1.Cells(29, 4) = Me.ComboBox1  
Sheet1.Cells(31, 4) = Me.ComboBox5  
Sheet1.Cells(33, 4) = Me.ComboBox3  
Sheet1.Cells(35, 4) = Me.ComboBox4  
Sheet1.Cells(36, 4) = Me.ComboBox6
```

```
Unload Me  
Sheet1.Activate  
Range("a1").Select
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
Unload Me
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Label4_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
```

```
For I = 18 To 23
```

```
Me.ComboBox5.AddItem Sheet4.Cells(I, 2)
```

```
Next I
```

```
For j = 6 To 11
```

```
Me.ComboBox1.AddItem Sheet4.Cells(j, 2)
```

```
Next j
```

```
For h = 30 To 35
```

```
Me.ComboBox3.AddItem Sheet4.Cells(h, 2)
```

```
Next h
```

```
For k = 40 To 42
```

```
Me.ComboBox4.AddItem Sheet4.Cells(k, 2)
```

```
Next k
```

```
End Sub
```

## 7.4 Códigos Usados en la Programación de la Estimación de Costes Mediante un Proceso de Moldeo por Forjado.

Funciones para calcular el rango en el cual se encuentra un dato de una celda, para después poder hacer búsquedas de datos en tablas.

```
Function Calcular_Rango() As String
```

```
    Select Case Range("D24")
```

```
        Case Is <= 1.5
```

```
            Calcular_Rango = "<=1,5"
```

```
            Exit Function
```

```
        Case Is < 3
```

```
            Calcular_Rango = "1,5_3"
```

```
            Exit Function
```

```
        Case Is < 6
```

```
            Calcular_Rango = "3_6"
```

```
            Exit Function
```

```
        Case Is > 6
```

```
            Calcular_Rango = ">6"
```

```
            Exit Function
```

```
    End Select
```

```
End Function
```

```
Function Calcular_RangoFfc() As String
```

```
  Select Case Range("D24")
```

```
    Case Is <= 2
```

```
      Calcular_RangoFfc = "<=2"
```

```
      Exit Function
```

```
    Case Is < 6
```

```
      Calcular_RangoFfc = "2_6"
```

```
      Exit Function
```

```
    Case Is > 6
```

```
      Calcular_RangoFfc = ">=6"
```

```
      Exit Function
```

```
  End Select
```

```
End Function
```

```
Function Calcular_Rangodave() As String
```

```
  Select Case Range("H31")
```

```
    Case Is <= 12.7
```

```
      Calcular_Rangodave = "<=12,7"
```

```
      Exit Function
```

```
    Case Is < 22.86
```

```
      Calcular_Rangodave = "12,7_22,86"
```

```
      Exit Function
```

```
    Case Is > 22.86
```

```
      Calcular_Rangodave = ">=22,86"
```

```
      Exit Function
```

```
  End Select
```

```
End Function
```

```
Function Calcular_RangoFc() As String
```

```
  Select Case Range("D77")
```

```
    Case Is <= 1.5
```

```
      Calcular_RangoFc = "1_1,5"
```

```
      Exit Function
```

```
    Case Is < 1.8
```

```
      Calcular_RangoFc = "1,5_1,8"
```

```
      Exit Function
```

```
    Case Is > 1.8
```

```
      Calcular_RangoFc = ">1,8"
```

```
      Exit Function
```

```
  End Select
```

```
End Function
```

```
Private Sub Worksheet_SelectionChange(ByVal Target As Range)
```

```
  If Target.Address = "SDS7" Or Target.Address = "SDS10" Or Target.Address = "SDS11" Or Target.Address = "SDS12" Or Target.Address = "SDS24" Then
```

```
    Range("D25") = Calcular_Rango
```

```
  End If
```

```
  If Target.Address = "SDS7" Or Target.Address = "SDS10" Or Target.Address = "SD$11" Or Target.Address = "SDS12" Or Target.Address = "SDS24" Then
```

```
    Range("H40") = Calcular_RangoFfc
```

```
  End If
```

```
  If Target.Address = "SDS7" Or Target.Address = "SDS8" Or Target.Address = "SHS31" Then
```

```
    Range("H53") = Calcular_Rangodave
```

```
  End If
```

```
  If Target.Address = "SDS8" Or Target.Address = "SDS9" Or Target.Address = "SDS77" Then
```

```
    Range("D78") = Calcular_RangoFc
```

```
  End If
```

```
End Sub
```

Macro que activada mediante un botón determina la clasificación del tipo de forja:

```
Sub tipoforja()  
  
L_W = Sheet1.Cells(18, 4)  
L_T = Sheet1.Cells(19, 4)  
If L_W <= 2 Then  
    If L_T <= 2 Then  
        Sheet1.Cells(21, 4) = "CLASE 0"  
    Else  
        Sheet1.Cells(21, 4) = "CLASE 1"  
    End If  
ElseIf L_W > 2 Then  
    Sheet1.Cells(21, 4) = "CLASE 2"  
End If  
End Sub
```

### Userform1

```
Private Sub CommandButton1_Click()'Boton aceptar  
If Me.ComboBox1 <> "" And Me.ComboBox5 <> "" And Me.ComboBox4 <> "" And  
Me.ComboBox3 <> "" Then  
    Sheet1.Cells(5, 4) = Me.ComboBox1  
    Sheet1.Cells(6, 4) = Me.ComboBox5  
    Sheet1.Cells(20, 4) = Me.ComboBox3  
    Sheet1.Cells(82, 4) = Me.ComboBox4  
    Unload Me  
    Sheet1.Activate  
    Range("a1").Select  
Else  
    MsgBox "Debe introducir todos los datos antes de continuar", vbOKOnly + vbExclamation,  
"Error"  
End If  
End Sub  
  
'Boton salir  
Private Sub CommandButton2_Click()  
    Unload Me  
End Sub
```

```
Private Sub Label4_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
```

```
For i = 4 To 27
```

```
Me.ComboBox5.AddItem Sheet3.Cells(i, 2)
```

```
Next i
```

```
For j = 4 To 27
```

```
Me.ComboBox1.AddItem Sheet3.Cells(j, 2)
```

```
Next j
```

```
For h = 5 To 8
```

```
Me.ComboBox3.AddItem Sheet2.Cells(h, 3)
```

```
Next h
```

```
For k = 11 To 12
```

```
Me.ComboBox4.AddItem Sheet5.Cells(k, 2)
```

```
Next k
```

```
End Sub
```

## 8. COMPARATIVA.

Una vez explicado el funcionamiento del programa de cálculo, se va a realizar un ejemplo con cada programa para la fabricación de una pieza determinada.

Obtendremos como resultado el coste estimado de fabricación de la pieza y por último se hará una comparación con otro método de estimación de costes propuesto por Ioan Marinescu en su libro *“Product Design for Manufacture and Assembly”*.

### 8.1 Datos de la Pieza a Fabricar.

La forma de la pieza a fabricar es la siguiente:

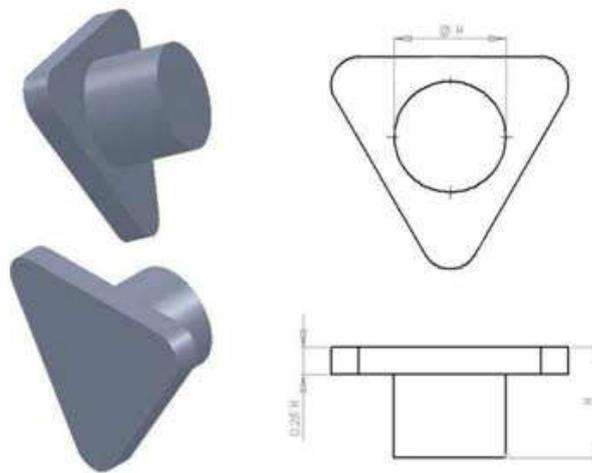


Ilustración 8.1.1 Geometría de la pieza deseada.

Para la fabricación se parte de un cilindro de altura 60 mm y de diámetro exterior de 150 mm como el que muestra la ilustración 8.1.2.

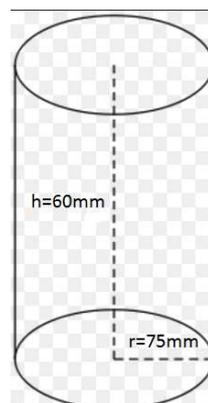


Ilustración 8.1.2 Cilindro macizo.

## 8.2 Estimación de Costes Mediante un Proceso de Mecanizado.

Hay varios materiales a elegir en el programa para este proceso, pero para esta demostración utilizaremos un acero de bajo carbono.

Conocida la geometría de la pieza es posible establecer una secuencia de operaciones para su fabricación. Esta secuencia sería: torneado y fresado.

Una de las hipótesis que se ha tomado a la hora de realizar este método es que la pieza se fabricará en un centro de mecanizado, en el cual es posible llevar a cabo todas las operaciones necesarias para realizar la pieza. La ventaja de emplear esta máquina es que se elimina el tiempo de transporte entre máquinas en caso de realizar cada operación en una máquina específica. También se ha supuesto que la cogida es de tipo horizontal.

Datos numéricos a ingresar en el programa de cálculo:

Longitud de la pieza: 60 mm.

Diámetro exterior: 150 mm.

Volumen de la pieza:  $2,04 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$ .

Área de la pieza: 8027 mm<sup>2</sup>.

COSTE MATERIAL		Selección de datos	
Material	Carbon Steel	Densidad (Kg/mm <sup>3</sup> )	7,83E-06
Forma	Round bar or rod	Cd (coste material en €/libra)	0,51
Longitud (mm)	60,00	Área (mm <sup>2</sup> )	8027,00
Diámetro Exterior (mm)	150	Volumen (mm <sup>3</sup> )	20400,00
Número de piezas a fabricar	0	Peso (Kg)	0,16
Volumen de la pieza(mm <sup>3</sup> )	20400	Rango de peso (Kg)	0,2-4,5
Área de la pieza (mm <sup>2</sup> )	8027	Cm(coste material) (€/kg)	1,12
		Cmp (€)	0,179219304

COSTE OPERACIÓN DE TORNEADO		Selección de datos	
Tipo de sujeción del Torno	Fixture, horizontal (3 screws)	Tasa total operador y máquina (€/s)	0,0083
Tipo de máquina herramienta	Machining center	Tcd (s)	33,1
Tipo de operación	Turning, facing and boring	Tpcr (s)	8
Tf tiempo empleado en un viaje de ida y vuelta (s)	315	Ttr (s)	0
ap (profundidad de corte) (in)	1,76	Tiempo no productivo (s)	41,1
W_cm (peso bandeja de piezas para carga máx) (lb)	2000	Vf (in <sup>2</sup> /min)	85
W_cm / W	5691	Potencia específica de corte (hp/in <sup>3</sup> /min)	1,4
Am (area de mecanizado) (in <sup>2</sup> )	438,2521752	Potencia mecánica (hp)	1,621518806
Tipo de material de la herramienta	Herramientas de carburo	n	0,25
		TMCT (tiempo mecanizado coste min) (s)	309,3544766
		TMPT (tiempo mecanizado potencia máx) (s)	39957,1077
		Cmin (€)	2,65877216
		Cpo (€)	331,985124

Ilustración 8.2.1. Coste del material y de la operación de torneado.

COSTE OPERACIÓN DE FRESADO		Selección de datos	
Longitud a ser fresada(in)	376	Tasa total operador y máquina (€/s)	0,0083
Tipo de sujeción del Torno	Fixture, horizontal (3 screws)	Tcd (s)	33,1
Tipo de máquina herramienta	Machining center	Tpcr (s)	8
Tipo de operación	Milling	Ttr (s)	0
Tf tiempo empleado en un viaje de ida y vuelta (s)	315	Tiempo no productivo (s)	41,1
ap (profundidad de corte)(in)	0,25	Vf (in <sup>2</sup> /min)	9,4
W_cm (peso bandeja de piezas para carga máx) (lb)	2000	Potencia específica de corte (hp/in <sup>3</sup> /min)	1,5
W_cm / W	5691,351195	Potencia mecánica (hp)	1,621518806
Am (area de mecanizado) (in <sup>2</sup> )	2746,380298	n	0,25
Tipo de material de la herramienta	Brazed carb.(End)	TMCF (tiempo fresado coste min) (s)	94,32
		TMFP (tiempo fresado potencia máx) (s)	38108,44281
		Cmin (€)	0,873986
		Cpo (€)	316,641205

Ilustración 8.2.2. Coste de la operación de fresado.

Una vez tenemos los resultados de los coste de las operaciones requeridas, podemos elegir si queremos entre un cote mínimo o trabajar a una potencia máxima lo cual conllevará a un coste más elevado.

Para esta demostración tomaremos el coste total mínimo es cual toma el valor de 3,71€ por pieza.

### 8.3 Estimación de Costes Mediante un Proceso de Moldeo por Inyección de Plásticos.

Para el moldeo por inyección de plásticos se elige como material Poliamida (6/6 Nylon).

Los datos a ingresar en el programa son los siguientes:

Número de piezas a fabricar: 60000 piezas en un lote.

Volumen de la pieza en  $\text{cm}^3$ : 20.

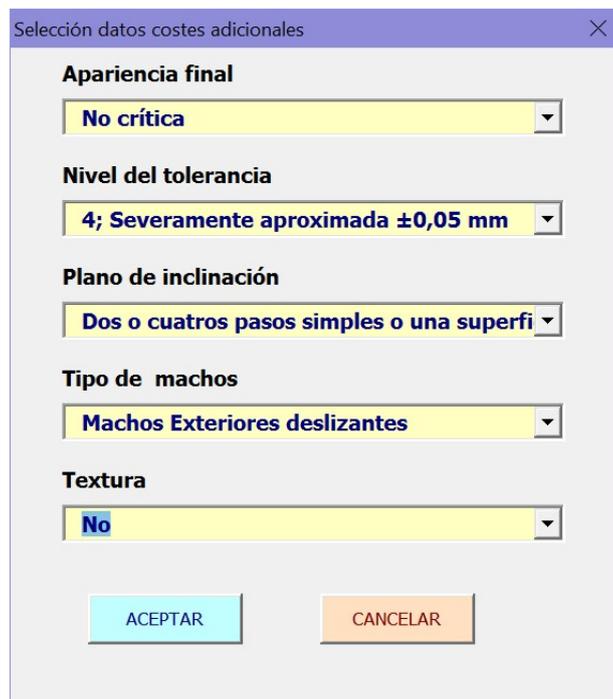
Área proyectada total: 18,67  $\text{cm}^2$ .

Part Volume: 24

Número de segmentos de superficie interiores: 4.

Número de segmentos de superficie exteriores: 6.

Se han supuesto las siguientes características para el cálculo de los costes adicionales:



The image shows a software dialog box titled "Selección datos costes adicionales" with a close button (X) in the top right corner. The dialog contains several dropdown menus with the following selected options:

- Apariencia final:** No crítica
- Nivel del tolerancia:** 4; Severamente aproximada  $\pm 0,05$  mm
- Plano de inclinación:** Dos o cuatros pasos simples o una superfi
- Tipo de machos:** Machos Exteriores deslizantes
- Textura:** No

At the bottom of the dialog, there are two buttons: "ACEPTAR" (Accept) and "CANCELAR" (Cancel).

Ilustración 8.3.1. Características seleccionadas para el cálculo de los costes adicionales.

Una vez introducidos todos los datos, obtenemos el coste total por pieza de 0,3692€.

## 8.4 Estimación de Costes Mediante un Proceso por Forjado.

Para la estimación del coste por forja se elige como material una aleación de cobre y para el molde una aleación de acero.

Datos a ingresar en el programa:

Número de piezas a fabricar: 60000 piezas.

Tamaño de los lotes: 1000 piezas.

Volumen de la pieza:  $2,04 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ .

Área proyectada:  $80,27 \text{ cm}^2$ .

L: 12,6 cm.

T: 60 cm.

W: 11,3 cm.

Número de forjas iguales por ciclo: 1.

Número de superficies unidas en la pieza que forman las cavidades inferior y superior: 6.

MATERIAL	20,07
PRODUCCIÓN	0,29
PUESTA A PUNTO DE LA MÁQUINA	0,02
COSTE DEL DADO	0,182
COSTE ELIMINACIÓN DE REBABA Y MEMBRANA	0,20
COSTE HERRAMIENTAS ELIMINACIÓN DE REBABA Y ME	0,02
<b>COSTE FINAL DE LA PIEZA (€)</b>	<b>20,78</b>

Ilustración 8.4.1. Coste final de la pieza moldeada mediante forjado.

Como muestra la ilustración 8.4.1 el coste final de la pieza es de 20,78€.

## 9. CONCLUSIONES.

---

Como se puede observar para la fabricación de 60.000 piezas, el proceso más económico es el moldeo por inyección de plásticos.

Los costes estimados de producción de la pieza ejemplo por los tres procesos son muy diferentes.

Hay muchos factores implicados en esta diferencia, entre ellos y muy importante es el material. Cada proceso conlleva un tipo de material y el coste de éste es muy diferente para cada caso.

Otro factor a tener en cuenta es el número de piezas a fabricar, ya que cuanto mayor sea, menor será el coste por pieza. Por ejemplo para el proceso de moldeo por inyección de plásticos, se requiere de la fabricación de un molde específico para la pieza, y este molde tiene un coste fijo, que evidentemente cuanto mayor sea el número de piezas a fabricar menor será la repercusión del coste del molde en el coste final de la pieza.

Como conclusión final a la comparativa de la fabricación de la pieza ejemplo, se tiene que cada proceso de fabricación va unido a unos materiales y condiciones específicas y que lo que determinará con que proceso es mejor realizar un pieza, no solo será el coste, si no la pieza en sí, sus características, y su funcionalidad.

El objetivo de este trabajo fin de máster se ve cumplido, ya que el fin es la obtención de los costes estimados sin la necesidad de saber cómo será la pieza final. En el ejemplo se han proporcionado datos muy a “grosso modo”, sin mucho nivel de detalle de cómo será la pieza final, y con los programas de cálculo se han obtenido unos costes estimados para cada proceso de fabricación, que es lo que se pretendía.

El conocimiento del coste estimado de una pieza por un proceso determinado es una gran ventaja a la hora de tomar una decisión de cómo fabricar una pieza, ya que aunque no sea exacto, da una idea de que proceso puede ser más económico según las características requeridas.

# ANEXO A. TABLAS Y GRÁFICOS UTILIZADOS PARA EL MECANIZO.

En el presente Anexo se muestran las tablas y gráficos de las cuales se ha hecho uso para la programación de la estimación del coste del proceso de mecanizado.

## A.1 Coste del Material.

Material	Densidad	
	lb/in <sup>3</sup>	Mg/m <sup>3</sup>
Carbon Steel	0,283	7,83
Alloy Steel	0,31	8,58
Stainless Steel	0,283	7,83
Tool Steel	0,283	7,83
Aluminum alloys	0,1	2,77
Brass	0,31	8,58
Nickel alloys	0,3	8,3
Magnesium alloys	0,066	1,83
Zinc alloys	0,23	6,37
Titanium alloys	0,163	4,51

Tabla A1.1. Diferentes materiales utilizados para el proceso de mecanizado.

Material	Cdl						
	Plate	Sheet	Square bar	Rectangular bar	Hexagonal bar	Round bar or rod	Tubing
Carbon Steel	0,42	0,36	0,51	0,51	0,51	0,51	0,92
Alloy Steel	_____	1,2	0,75	0,75	0,75	0,75	_____
Stainless Steel	2,5	2,5	1,5	1,5	1,5	1,5	_____
Tool Steel	6,44	_____	6,44	6,44	6,44	6,44	_____
Aluminum alloys	2,5	1,95	1,93	1,93	1,93	1,93	4,6
Brass	1,9	1,9	0,9	0,9	0,9	1,22	1,9
Nickel alloys	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	_____
Magnesium alloys	6,06	6,06	3,35	3,35	3,35	3,35	3,35
Zinc alloys	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	_____
Titanium alloys	25	25	15,4	15,4	15,4	15,4	_____

Tabla A.1.2. Coste del material en \$/lb en función del material y de la forma base.

## A.2. Tablas Generales para Tiempos no Productivos y Gráfico de Potencia Necesaria.

Dispositivo de sujeción (kg)	Peso pieza				
	0-0,2	0,2-4,5	4,5-14	14-27	
Dispositivo de sujeción (lb)	0-0,4	0,4-10	10_30	30-60	Grúa
Angle plate (2 U-clamps)	27,6	34,9	43,5	71,2	276,5
Between centers, no dog	13,5	18,6	24,1	35,3	73,1
Between centers, whit dog	25,6	40,2	57,4	97,8	247,8
Chuck, universal	16	23,3	31,9	52,9	0
Chuck, independent (4 jaws)	34	41,3	49,9	70,9	0
Clamp on table (3 clamps)	28,8	33,9	39,4	58,7	264,6
Collet	10,3	15,4	20,9	0	0
Faceplate (3 clamps)	31,9	43,3	58	82,1	0
Fixture, horizontal (3 screws)	25,8	33,1	41,7	69,4	274,7
Fixture, vertical (3 screws)	27,2	38,6	53,3	0	0
Hand-held	1,4	6,5	12	0	0
Jig	25,8	33,1	41,7	0	0
Magnet table	2,6	5,2	8,4	0	0
Parallels	14,2	19,3	24,8	67	354,3
Rotary table or index plate (3 clamps)	28,8	36,1	44,7	72,4	277,7
"V" Blocks	25	30,1	35,6	77,8	365,1
Vise	13,5	18,6	24,1	39,6	174,2

Tabla A.2.1. Tiempo (s) carga y descarga en función del dispositivo de sujeción.

Máquina herramienta	T acoplamiento (s)	T ajuste (h)	sistema adicional (h)
Horizontal band saw	0	0,17	0
Manual turrent lathe	9	1,2	0,2
CNC turrent lathe	1,5	0,5	0,15
Machining center	8	0,7	0,05
Milling machine	30	1,5	0
Drilling machine	9	1	0
Horizontal -boring machine	30	1,3	0
Broaching machine	13	0,6	0
Gear hobbing machine	39	0,9	0
Grinding machine	19	0,6	0
Internal grinding machine	24	0,6	0

Tabla A.2.2. Tiempos no productivos para maquinas herramientas comunes.

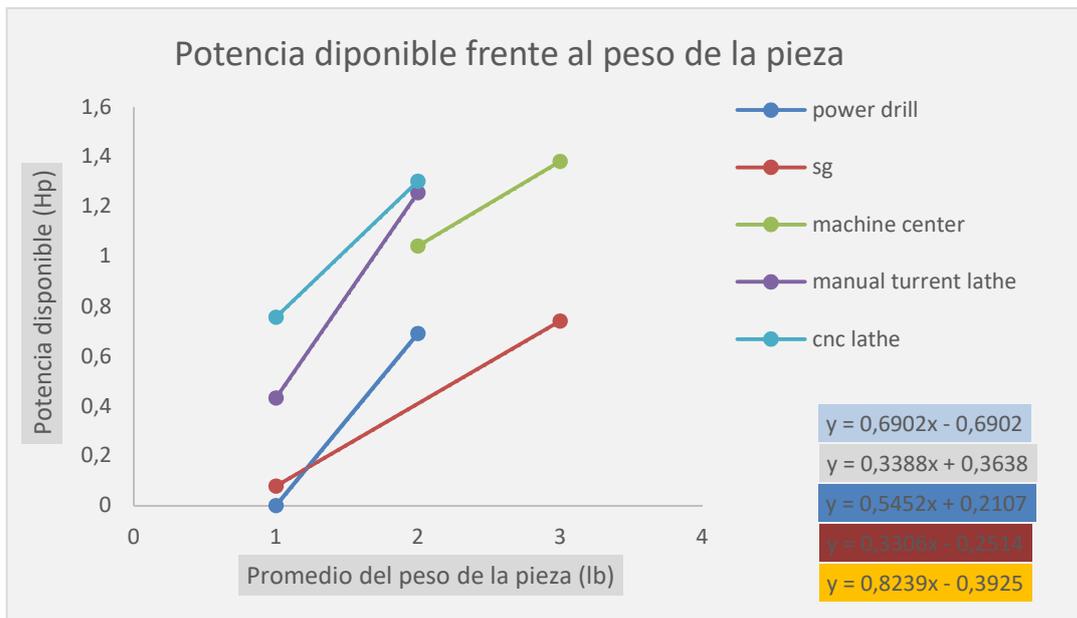


Gráfico A.2.3. Potencia necesaria en función del peso de la pieza.

### A.3. Coste por Operación de Torneado.

Material	Turning, facing and boring			Drilling and reaming (1in.)	
	HSS	Herramientas de carburo	p_s (hp/in <sup>3</sup> /min)	HSS(Drilling and reaming)	p_s (hp/in <sup>3</sup> /min)
Carbon Steel	20,3	85	1,4	14,2	1,3
Alloy Steel	23,7	96	1,3	16,4	1,15
Stainless Steel	12,6	48	1,55	9,4	1,35
Tool Steel	12,8	54	1,45	6,2	1,4
Aluminum alloys	176	352	0,28	79,8	0,18
Brass	76,8	196	0,72	38,4	0,54
Nickel alloys	9	42	2,25	14,3	2
Magnesium alloys	162	360	0,18	75,2	0,18
Zinc alloys	58,5	113	0,3	51,1	0,2
Titanium alloys	12,6	24	1,35	7,9	1,25

Tabla A.3.1. Torneado. Velocidad por el avance y potencia específica de corte para diferentes tipos de herramientas y tipo de operación en función del material.

#### A.4. Costes por Operación de Fresado.

Milling $v_f$ (in/min)					
Material	Side and face		End (1,5 in.)		$P_s$ (hp/in <sup>3</sup> /min)
	HSS	Brazed carbure	HSS	Brazed carbure	
Carbon Steel	12,15	40,3	2	9,4	1,5
Alloy Steel	13,7	40,2	2,7	10,5	1,3
Stainless Steel	14	41	2,4	6	1,7
Tool Steel	6,7	23,7	0,9	4,5	1,5
Aluminum alloys	96,2	216,5	20,4	36,7	0,36
Brass	50,5	108,3	9,9	20,7	0,72
Nickel alloys	4,1	7,7	1	0	2,15
Magnesium alloys	77	240,6	27,5	55	0,18
Zinc alloys	28	60,1	9,8	16	1,4
Titanium alloys	3,9	13,2	1,5	7,1	1,25

Tabla A.4.1. Fresado. Velocidad por el avance y potencia específica de corte para diferentes tipos de herramientas y tipo de operación en función del material.

#### A.5. Costes por Operación de Rectificado Basto.

Material	$Z_w/W_t$ (in <sup>2</sup> /min)	$P_s$ (hp/in <sup>3</sup> /min)
Carbon Steel	0,68	13
Alloy Steel	0,68	14
Stainless Steel	0,45	14
Tool Steel	0,68	14
Aluminum alloys	0,89	6,5
Brass	0,89	11
Nickel alloys	0,15	22
Magnesium and alloys	0,89	6,5
Zinc alloys	0,89	6,5
Titanium alloys	0,9	16

Tabla A.5.1. Rectificado basto. Tasa de material eliminado y potencia específica de corte en función del material.

# ANEXO B. TABLAS Y GRÁFICOS USADOS PARA EL MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICOS.

**E**n este Anexo se muestran las tablas y gráficos de las cuales se ha hecho uso para la programación de la estimación del coste del proceso de moldeo por inyección de plásticos.

## B.1. Materiales Termoplásticos.

TERMOPLASTICOS	Límite elástico(MN/m <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidad(MN/m <sup>2</sup> )	HDT(°C)	Coste(\$/KG)
Polietileno de alta densidad	23	925	42	0,9
Poliestireno de alto impacto	20	1900	77	1,12
Acrlonitrilo-butadieno-estireno(ABS)	41	2100	99	2,93
Acetato	66	2800	115	3,01
Poliamida(6/6 Nylon)	70	2800	93	4
Policarbonato	64	2300	130	4,36
Policarbonato(30% cristal)	90	5500	143	5,54
Óxido de polifenileno modificado(PPO)	58	2200	123	2,75
PPO modificado(30%cristal)	58	3800	134	4,84
Polipropileno(40% talco)	32	3300	88	1,17
Poliester teleftalato(30% cristal)	158	11000	227	3,74

Tabla B.1.1 Materiales termoplásticos típicos para el moldeo por inyección de plásticos con algunas de sus propiedades.

## B.2. Dimensionamiento de la Máquina Inyectora.

Part volume(cm <sup>3</sup> )	shot size (cm <sup>3</sup> )	Runner (%)
16	22	37
32	41	28
64	76	19
128	146	14
256	282	10
512	548	7
1024	1075	5

Tabla B.2.1 % del área correspondiente al sistema de alimentación en función del part volumen.

Fuerza de separación(KN)	Capacidad de llenado(cc)	Coste de operación(\$/h)	Tiempo del ciclo seco(s)	Máxima carrera(cm)	Potencia de accionamiento(KW)
300	34	28	1,7	20	5,5
500	85	30	1,9	23	7,5
800	201	33	3,3	32	18,5
1100	286	36	3,9	37	22
1600	286	41	3,6	42	22
5000	2290	74	6,1	70	63
8500	3636	108	8,6	85	90

Tabla B.2.2. Características de las diferentes máquinas de molde por inyección.

	FLAT	BOX	CYLINDRICAL
Mold open	2	2,5	3
Part eject	0	1,5	3
Mold close	1	1	1

Tabla B.2.3. Tiempo de operación de sujeción de la máquina (s).

### B.3. Costes Adicionales.

Apariencia	%
No crítica	10
Opaca, estándar(SPE#3)	15
Transparente, estándar	20
Opaca, cristal alto	25
Transparente, alta calidad	30
Transparente, calidad óptica	40

Tabla B.3.1. % de incremento sobre las horas de fabricación total del molde para diferentes niveles de apariencia.

Nivel de tolerancia	% de incremento
0 ;Todas mayores de $\pm 0,5$ mm	0
1; Más aproximada $\pm 0,35$ mm	2
2; Severamente aproximada $\pm 0,25$ mm	5
3; Más aproximada $\pm 0,25$ mm	10
4; Severamente aproximada $\pm 0,05$ mm	20
5; Más aproximada $\pm 0,05$ mm	30

Tabla B.3.2. % de incremento sobre las horas de fabricación total del molde para diferentes niveles de tolerancia.

Tipo de superficie de partición	Factor (f_p)
Plano de separación plana	0
Superficie de separación inclinada o una que contiene un solo paso	1,25
Dos o cuatros pasos simples o una superficie curva simple	2
Mayor que cuatro pasos simples	2,5
Superficie curvada compleja	3
Superficie curvada compleja con pasos	4

Tabla B.3.3. Factor según el tipo de plano de separación requerido.

Tipo de machos	Horas
Machos Interiores deslizantes	200
Machos Exteriores deslizantes	80
Machos desenroscables	300

Tabla B.3.4. Número de horas a incrementar por la presencia de machos.

# ANEXO C. TABLAS Y GRÁFICOS PARA EL MOLDEO MEDIANTE FORJADO.

En este Anexo se muestran las tablas y gráficos de las cuales se ha hecho uso para la programación de la estimación del coste del proceso de moldeo mediante forjado.

## C.1. Coste del Material.

Materiales	$\alpha_m$ (Kg-m/mm <sup>2</sup> )	$\beta_m$	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Aleación de aluminio, Grupo A	0,054	1	2,7
Aleación de aluminio, Grupo B	0,087	1	2,7
Aleación de Magnesio	0,065	1	1,74
Cobre y aleación de cobre	0,065	1	8,96
Carbono y aleaciones de acero, Grupo A	0,065	1	7,83
Carbono y aleaciones de acero, Grupo B	0,076	0,8	7,83
Carbono y aleaciones de acero, Grupo C	0,087	0,7	7,83
Carbono y aleaciones de acero, Grupo D	0,098	0,6	7,83
Aceros inoxidables ferríticos y martensíticos	0,109	0,3	7,7
Aceros para herramientas	0,109	0,3	7,85
Aceros martensíticos	0,109	0,3	7,75
Aceros inoxidables austeníticos	0,13	0,3	7,9
Aceros inoxidables PH	0,141	0,3	7,5
Aleaciones de níquel de hierro	0,13	0,3	8,9
Titanio y aleaciones de titanio, $\alpha$ y aleaciones $\alpha/\beta$	0,163	0,2	4,54
Aleaciones de titanio, aleaciones $\beta$	0,195	0,2	4,51
Super aleaciones a base de hierro	0,152	0,2	7,87
Super aleaciones a base de cobalto	0,195	0,2	8,9
Super aleaciones a base de níquel	0,22	0,1	8,9
Aleaciones de niobio	0,195	0,1	8,57
Aleaciones de molibdeno	0,217	0,1	10,22
Aleaciones de tantalio	0,124	0,1	16,65
Aleaciones de tungsteno	0,26	0,1	19,3
Berilio	0,065	0,5	1,85

Tabla C.1.1. Materiales típicos para el moldeo por forjado con algunas de sus propiedades.

## C.2. Clasificación del Tipo de Forja y Etapas.

Descripción	Segundo dígito
Parting line Flat, no side depressions	0
Parting line not Flat, no side depressions	1
Parting line Flat, side depressions	2
Parting line not Flat, side depressions	3

Tabla C.2.1. Líneas de partición de los moldes.

$\alpha_s$ Segundo dígito	Ffc			
	$\leq 1,5$	1,5_3	3_6	$>6$
0_0	1,6	1,7	1,9	2,2
0_1	1,6	1,7	1,9	2,2
0_2	1,6	1,7	1,9	2,2
0_3	1,6	1,7	1,9	2,2
1_0	1	1,25	1,4	1,6
1_1	1,05	1,3	1,45	1,65
1_2	1	1,25	1,4	1,6
1_3	1,05	1,3	1,45	1,65
2_0	1	1,1	1,2	1,3
2_1	1,2	1,3	1,45	1,7
3_0	1,05	1,15	1,25	1,4
3_1	1,25	1,35	1,5	1,7

Tabla C.2.2. Factor de forma del material en función de la clase de forja.

$\beta_s$ Segundo dígito	Ffc			
	$\leq 1,5$	1,5_3	3_6	$>6$
0_0	0,95	0,9	0,75	0,55
0_1	0,7	0,6	0,5	0,3
0_2	2	0,6	0,5	0,3
0_3	0,65	0,5	0,45	0,25
1_0	1	0,75	0,45	0,3
1_1	0,9	0,7	0,4	0,3
1_2	1	0,75	0,45	0,3
1_3	0,9	0,7	0,4	0,3
2_0	0,9	0,85	0,75	0,6
2_1	0,65	0,6	0,5	0,35
3_0	0,9	0,85	0,75	0,5
3_1	0,65	0,6	0,5	0,35

Tabla C.2.3. Factor de complejidad de forma en función de la clase de forja.

Nop	Ffc			
Segundo dígito	<=1,5	1,5_3	3_6	>6
0_0	2	3	3	4
0_1	2	3	3	4
0_2	2	3	3	4
0_3	2	3	3	4
1_0	2	3	3	4
1_1	2	3	3	4
1_2	2	3	3	4
1_3	2	3	3	4
2_0	3	4	5	6
2_1	2	3	3	4
3_0	4	5	6	7
3_1	4	5	6	7

Tabla C.2.4. Número de operaciones requeridas en función de la clase de forja.

Nsb/ Nop	2	3	4	5	6	7
CLASE 0	1	1	1	_____	_____	_____
CLASE 1	1	1	1	_____	_____	_____
CLASE 2	_____	0	0	0	0	_____
CLASE 3	_____	_____	0	0	0	0

Tabla C.2.5. Scale brake en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones.

Nbk / Nop	2	3	4	5	6	7
CLASE 0	0	1	1	_____	_____	_____
CLASE 1	0	1	1	_____	_____	_____
CLASE 2	_____	1	1	1	1	_____
CLASE 3	_____	_____	1	1	1	1

Tabla C.2.6. Blocker en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones.

Nsf /Nop	2	3	4	5	6	7
CLASE 0	0	0	1	_____	_____	_____
CLASE 1	0	0	1	_____	_____	_____
CLASE 2	_____	0	0	0	1	_____
CLASE 3	_____	_____	0	0	0	1

Tabla C.2.7. Semifinisher en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones.

Nfn / Nop	2	3	4	5	6	7
CLASE 0	1	1	1	_____	_____	_____
CLASE 1	1	1	1	_____	_____	_____
CLASE 2	_____	1	1	1	1	_____
CLASE 3	_____	_____	1	1	1	1

Tabla C.2.8. Finisher en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones.

Nbnd / Nop	2	3	4	5	6	7
CLASE 0	0	0	0	_____	_____	_____
CLASE 1	0	0	0	_____	_____	_____
CLASE 2	_____	0	0	0	0	_____
CLASE 3	_____	_____	1	1	1	1

Tabla C.2.9. Bender en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones.

Nedg / Nop	2	3	4	5	6	7
CLASE 0	0	0	0	_____	_____	_____
CLASE 1	0	0	0	_____	_____	_____
CLASE 2	_____	1	1	1	1	_____
CLASE 3	_____	_____	1	1	1	1

Tabla C.2.10. Edger en función de la primera cifra de la clase y el número de operaciones.

nf1 / Nop	2	3	4	5	6	7
CLASE 0	0	0	0	_____	_____	_____
CLASE 1	0	0	0	_____	_____	_____
CLASE 2	_____	0	1	1	1	_____
CLASE 3	_____	_____	0	1	1	1

Tabla C.2.11. Fuller stage 1 en función del primera cifra de la clase y el número de operaciones.

nf2 / Nop	2	3	4	5	6	7
CLASE 0	0	0	0	_____	_____	_____
CLASE 1	0	0	0	_____	_____	_____
CLASE 2	_____	0	0	1	1	_____
CLASE 3	_____	_____	0	0	1	1

Tabla C.2.12. Fuller stage 2 en función del primera cifra de la clase y el número de operaciones.

### C.3. Costes Eliminación de la Rebaba.

	A <sub>0</sub> (h)	Mp (h/cm <sup>2</sup> )	Tlk (h)
1_1,5	0,62	0,0143	2
1,5_1,8	2,52	0,0146	3
>1,8	5,08	0,0168	0
>1,8 die lock	8,86	0,0203	0

Tabla C.3.1. Estimación de tiempos para el corte de la rebaba.

### C.4. Costes de Producción.

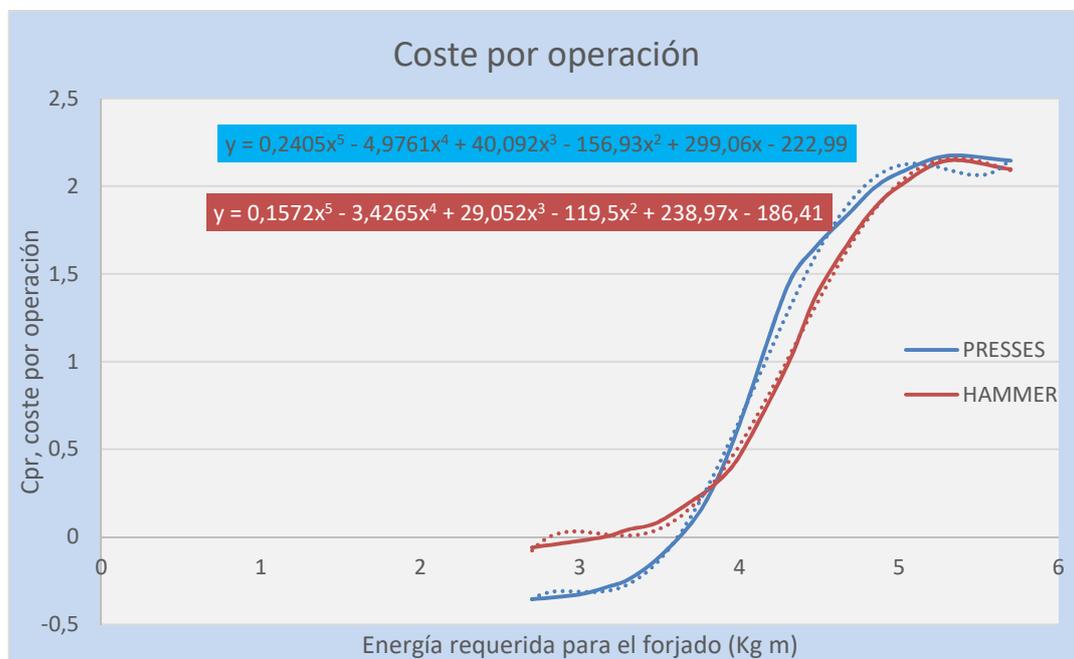


Gráfico C.4.1 Coste por operación frente a la energía requerida para el forjado.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- 1.- *Product Design for Manufacture and Assembly*, Geoffy Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston Knight.
- 2.- Apuntes de la asignatura de Procesos de Fabricación del Máster en Ingeniería Aeronáutica.
- 3.- <http://www.aulaalic.es/visualbasic/>
- 4.- [http://www.recursosvisualbasic.com.ar/hm/tutoriales/tutorial\\_visual\\_basic\\_menu.htm](http://www.recursosvisualbasic.com.ar/hm/tutoriales/tutorial_visual_basic_menu.htm)
- 5.- [http://www.solodivers.com/manuales/programacion\\_visualbasic](http://www.solodivers.com/manuales/programacion_visualbasic)
- 6.- <http://www.manualespdf.es/manual-programacion-visual-basic-net/>
- 7.- <http://www.canalvisualbasic.net/manual/inicio-visual-basic/>
- 8.- <http://www.lawebdelprogramador.com/cursos/Visual-Basic/4135-Tutorial-de-Visual-Basic-para-principiantes.html>
- 9.- <http://es.excelworld.net/tutoriales/tutorial-de-excel-avanzado>
- 10.- <http://www.excelintermedio.com/>
- 11.- <https://manual-de-funciones-excel.softonic.com>
- 12.- <http://www.consultasdeinteres.com/2014/01/libro-excel-avanzado-2013.html>