



INGENIERÍA DE FABRICACIÓN
MEMORIA TRABAJO DFM
4º G.I.T.I. - A.A. 2021/22

Grupo 6:

Giovanni Ploner - CA14855BS (Erasmus)

Guido Sassaroli – AY6607368 (Erasmus)

Julio Coveñas Pérez - 77495682B

Luis Bustamante Tosso - 77495579T

Índice

1 - Introducción

2 - Proceso y Objetivo

3 - Hipótesis Elegidas

4 - Estimación Costes y Dependencias

5 - Soluciones Alternativas

6 - Comparación con Presupuesto Real y Conclusiones

ANEXOS

1 - Introducción

El objetivo de este trabajo es el desarrollo y cálculo de los costes de fabricación de una pieza por fundición en arena verde. Las medidas de la pieza en consideración se pueden apreciar en **fig.1** y **fig.2** y en **fig.3** se muestra un diseño del producto final, hecho mediante CATIA V5.

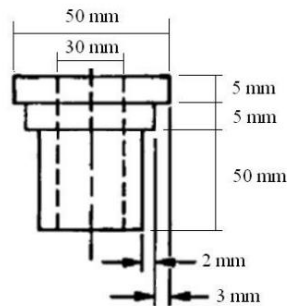


fig.1

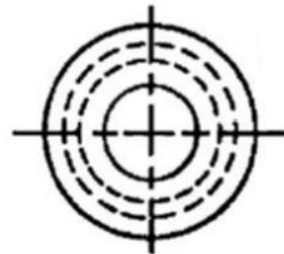


fig.2

2 - Proceso y Objetivo

El lote que se pretende fabricar consta de 30 000 unidades de bronce. Las piezas, con la forma antes descrita, tienen que tener una apariencia exterior no crítica y también un bajo coeficiente de fricción. Por el tamaño y características de la pieza, se puede suponer que va a ser empleada como cojinete en una junta mecánica (ejemplo en **fig.4**).

Se intentará optimizar el proceso en cuanto al ratio precio/pieza, teniendo en cuenta que nuestra línea dispone de 21 operarios y de una capacidad de 285 moldes por hora.

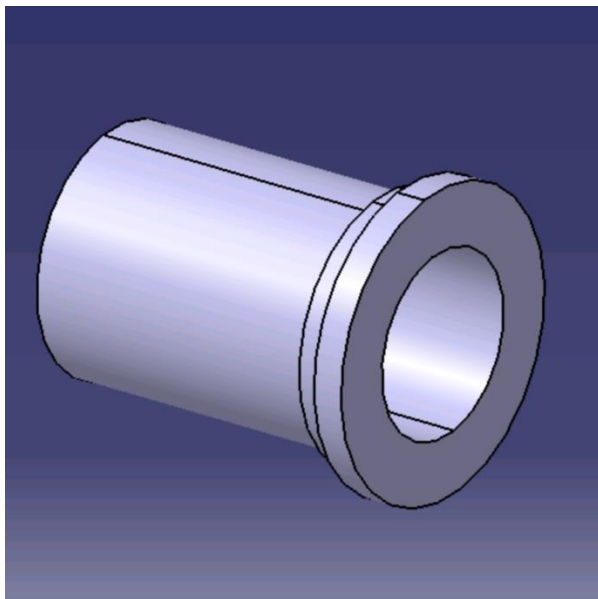


fig.3



fig.4

3 - Hipótesis Elegidas

- 4 piezas por caja;
- Factor de corrección dólares euros igual a 0.88 €/€;
- Horno en crisol basculante KB;
- Modelo de la pieza en hierro;
- Tolerancias de la piezas de 2.5 mm en cada dirección;
- Vertido, rectificado y proceso de manera manual;
- Precio del bronce: 1.452 €/kg;
- No gastos de transporte incluidos en el precio final.

4 - Estimación Costes y dependencias

A continuación, mostraremos el procedimiento para obtener el coste total de la fabricación de todas las piezas.

En primer lugar, calcularemos el coste del metal necesario teniendo en cuenta las dimensiones de nuestra pieza y su sobredimensionamiento.

Posteriormente, y dado que es fundición en arena verde, calcularemos el coste de la arena en función, tanto del volumen de la pieza, como del macho.

Luego, calculamos el coste de las herramientas en función del coste del patrón, tanto de la pieza, como del macho y por último calculamos el coste del proceso incluyendo aquí el coste de producir los machos, producir los moldes y la limpieza.

4.1 - Coste Metal

El primer coste a calcular es el coste del metal. Este supone un alto porcentaje en el total de los costes, generando normalmente entre un 30% y un 50% del total.

El primer paso es el cálculo del metal total que se necesita para producir las piezas.

Para calcular el peso total, se utiliza la siguiente ecuación:

$$W_p = n \cdot \rho \cdot V_{fc} \cdot \left[1 + 1.9 \cdot \left(\frac{L+W}{D} \right)^{(-0.701)} \right] = 6,1751 \text{ kg}$$

Siendo las variables utilizadas las siguientes:

$\rho = 8800 \text{ kg/m}^3$. Densidad del bronce.

$V_{fc} = 8.3553 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$. Volumen final de la pieza.

$n = 4$. Numero piezas por caja

$L = 65 \text{ mm}$. Longitud de la pieza.

$W = 55 \text{ mm}$. Ancho de la pieza.

$D = 55 \text{ mm}$. Profundidad de la pieza.

Luego, se debe calcular el coste del metal. Para esto, se debe incluir el coste de la materia prima, el de operación del horno y equipos auxiliares y el de generar la energía para fundir el metal.

Para ello se debe escoger un horno que sea adecuado para la fundición de cobre para la fabricación de la pieza en arena. El equipo escogido es un horno de crisol basculante KB, el cual tiene las siguientes características:

$F_{ff} = 80\%$ Eficiencia

Consumo medio = 0.185 kWh/kg

Por lo que, teniendo en cuenta el precio medio en España en 2021 (0,2226 €/kWh), el coste de la electricidad será:

$E_{ct} = 0,2226 \text{ €/kWh}$

Se calcula entonces el coste de la energía como:

$$C_{en} = \frac{E_{ct} \cdot M_{me}}{\frac{F_{ff}}{100}} = 0.0515 \text{ €/kg}$$

donde:

$M_{me} = 0.185 \text{ kWh/kg}$. Energía mínima de fundición.

Hallado esto, se calcula el coste del horno

$$C_{fk} = \frac{F_{fc}}{\rho} = 0.0412 \text{ €/kg}$$

donde:

$F_{fc} = 362,4544 \text{ €/m}^3$;

El coste del metal será entonces:

$$C_{ms} = C_{rm} + C_{en} + C_{fk} + C_{lk} = 1.5623 \text{ €/kg}$$

donde:

$C_{rm} = 1.452 \text{ euros/kg}$. Coste unitario de la materia prima.

$C_{lk} = 0.0176 \text{ euros/kg}$. Costo de mano de obra del horno.

Por lo que el precio unitario total del metal se calculará como:

$S_g = 2$. Porcentaje de chatarra.

$C_{cv} = 0.484 \text{ euros/kg}$. Valor de la chatarra del metal.

$$C_{mf} = \frac{C_{ms} * W_p - C_{cv} * (W_p - \rho * V_{fc})}{1 - \frac{S_g}{100}} = 1.7894 \text{ €/pieza}$$

4.2 - Coste Arena

A pesar que influyen menos del 5% del coste final, se consideran también los gastos para comprar nueva arena verde. El precio de arena depende sobre todo del tamaño de sus

granos: de hecho, a granos más finos corresponde un coste mayor, y un menor empleo de ligantes, que es más económico y menos perjudicial para el medioambiente y la polución. Otros elementos que influyen sobre el coste de arena son el transporte de ella, su enfriamiento y limpieza, que permiten reutilizarla y ahorrar mayor tiempo y dinero.

Según una encuesta hecha entre empresas de fundición de los EE.UU., se puede elegir como parámetro para el precio promedio de la arena 0.016 € por kg de metal vertido, dato que nos permite calcular:

$$C_{msd} = 0.016 * W_p = 0.0978 \text{ €/pieza}$$

Para fundir nuestra pieza también hace falta realizar un macho de arena. El coste de este tipo de arena suele ser mayor con respecto a la del molde, aproximadamente 0.074 € por kg de arena.

Además, es necesario tener en cuenta desgastes del macho que pueden ser entre el 4% hasta el 40%. Por sencillez empleamos un “scrap rate” igual a 8% para representar las pérdidas.

$$C_{csd} = \frac{\rho_{cs} * V_c * C_{cs}}{1 - \frac{S_c}{100}} = 0.0147 \text{ €/pieza}$$

donde:

$\rho_{cs} = 1387 \text{ kg/m}^3$, densidad arena de macho

$V_c = 3.289 * 10^{-5} \text{ m}^3$ volumen total machos

$S_c = 8$, porcentaje chatarra macho

Alternativamente es posible emplear una mezcla de arena y resina (ver apartado 6).

Entonces, a través de estos cálculos logramos, por una caja con n piezas, un coste de arena por pieza final igual a:

$$C_{arena} = \frac{C_{msd} + C_{csd}}{n} = 0.0281 \text{ €/pieza}$$

4.3 - Coste Herramienta

El primer paso para determinar el costo de las herramientas es determinar el tamaño de las mismas y el número de piezas que se pueden fundir por hora. En nuestro caso que también requerimos machos también deberán calcularse el costo de las cajas de machos.

Para determinar el coste del patrón es necesario distribuir el espacio de manera adecuada para moldes multicavidad. Para nuestra pieza dada sus dimensiones se recomienda 5 cm entre piezas y borde. Para las cajas de machos con 3 cm entre cavidades bastará.

El coste típico de un par de placas de montaje es:

$$C_{pm} = 0.51 * A_{pl} = 371.57 \text{ €}$$

donde

$A_{pl} = 728 \text{ cm}^2$ Área de la placa

Una vez que se conoce el coste de la placa base del patrón, el siguiente paso es calcular el coste de las impresiones del patrón. Esto se hace calificando la complejidad de la superficie exterior, en función del número de parches superficiales siendo un parche superficial un segmento que es plano o tiene un cambio constante o suave de curvatura. Otro factor a tener en cuenta es el número de cavidades.

También es importante tener en cuenta que si se usa una línea de fundición automatizada se incrementará coste en torno a un 25%

El coste de las impresiones será:

$$C_{pi} = R_t * (0.313 * N_{sp}^{1.27} + 0.085 * A_p^{1.2}) * N_{pi}^{0.7} = 3292.3 \text{ €}$$

donde:

$R_t = 35'200 \text{ €/h}$. Tasa de fabricación de herramientas (Taller de patrones)

$N_{sp} = 12$. Número de parches superficiales

$A_p = 125.7 \text{ mm}^2$. Área proyectada

$N_{pi} = 4$. Número de impresiones idénticas

El coste total del patrón será:

$$C_{pt} = G_f * (C_{pm} + C_{pi}) = 3663.8 \text{ €}$$

donde

$G_f = 1$ si es un proceso de fundición manual

$G_f = 1.25$ para una línea de colada automatizada

Para el macho se procederá de igual manera.

La caja de machos contiene cavidades que se forman mediante el cierre de dos placas. La placa superior contiene pasajes para que fluya la arena. Se deben perforar pequeños orificios para permitir que el aire escape de la cavidad a medida que se sopla la arena para reemplazarla. El coste se basa en la complejidad de la cavidad y el área proyectada. El número de parches superficiales es determinado mediante el mismo procedimiento descrito anteriormente:

$$C_{pmmacho} = 0.51 * A_{plmacho} = 113.44 \text{ €}$$

donde:

$A_{plmacho} = 222.25 \text{ cm}^2$ Área de la placa de la caja de los machos

$$C_{pimacho} = R_t * (0.313 * N_{spmacho}^{1.27} + 0.085 * A_{pmacho}) * N_{pimacho}^{0.7} = 1343.9 \text{ €}$$

donde:

$R_t = 35'200 \text{ €/h}$ Tasa de fabricación de herramientas (Taller de patrones),

$N_{spmacho} = 3$ Número de parches superficiales del macho

$A_{pmacho} = 67 \text{ mm}^2$ Área proyectada del macho

$N_{pimacho} = 4$ Número de impresiones idénticas

El coste total de una caja de machos será:

$$C_{box} = C_{pm} + C_{pi} = 1457.4\text{€}$$

Ct1 es el costo de herramienta por pieza

$$C_{t1} = \frac{C_{pt} + C_{box}}{n} = 0.17\text{€/pieza}$$

Donde:

$n = 4$ número de piezas por caja

También es interesante ver que para diferentes volúmenes de producción podemos utilizar materiales alternativos, aunque lo común es utilizar el hierro para fabricar las herramientas. La tabla a continuación muestra el número de ciclos para los que la herramienta puede usarse antes de ser reemplazada.

Pattern or core box material	Relative cost factor, R_{tf}	Tool life per cavity
Wood	0.25	2,500
Plastic	0.40	5,000
Cast iron	1.00	150,000
Stainless steel	1.18	180,000

En nuestro caso siendo el número de piezas por caja cuatro y al ser la herramienta de hierro fundido observamos que la esperanza de vida de la herramienta sería de 600000 piezas. Como nosotros tenemos que fabricar 30000 piezas no habría necesidad de reemplazar la herramienta lo que abarata los costes.

Vemos que utilizando por ejemplo madera tendríamos $2500 \cdot 4 = 10000$ luego tendríamos que cambiar la herramienta dos veces para llegar a 30000 y puede que nos quedemos muy justos. El coste de la herramienta se reduciría $\frac{1}{4}$, pero al reemplazarla 2 veces se reduciría solamente a $\frac{3}{4}$ y además con un peor acabado superficial luego no lo vemos muy recomendable.

Si quisiéramos todavía mejor acabado superficial por requerimientos de la pieza, podríamos optar por acero inoxidable que aumentarían los costes de herramienta en torno al 18%.

4.4 - Coste de Proceso

Los costes de procesamiento se dividen en tres categorías principales:

- A. el coste para **producir los machos**
- B. el coste para **producir los moldes y verter el metal**
- C. el coste para **limpiar las piezas fundidas**

A. Coste para producir los machos

Hay una gran cantidad de variables para determinar el costo para producir un macho. El costo del macho se ve afectado por su tamaño y por la tasa de producción de la máquina que producen los machos.

La tasa de producción de la máquina depende del tipo de fabricación de los machos.

El tipo de proceso de fabricación de los machos y el diseño del macho influye en la tasa de desechos (*scrap rate*). Una tasa de desechos S_c del 8% es razonable para propósitos de costes iniciales y para un macho como el nuestro, que no es demasiado delicado.

Todos estos factores se combinan y hacen que sea difícil hacer una estimación precisa del coste de un único macho.

Para hacer una mejor estimación es típico dividir el peso promedio de machos producidos por hora para el número de trabajadores.

Esto da una tasa de producción para el taller principal expresado en kilogramos de machos por hora de trabajador.

El coste de procesar un particular macho es:

$$C_{core} = \frac{\rho_{cs} * V_c * R_{cm}}{P_{cm} * \left(1 - \frac{S_c}{100}\right) * \left(\frac{P_{ff}}{100}\right)} = 0.5587 \text{ €/pieza}$$

donde

ρ_{cs} = densidad de la arena del macho, kg / m³

V_c = volumen del macho, m³

P_{ff} = 85 %, eficiencia de la planta (tiempo de producción real / tiempo total disponible) x 100

R_{cm} = 44 €/h, tasa de trabajador para la fabricación de machos

P_{cm} = 53 kg/h-trabajador, tasa de producción de macho

Un valor típico para la eficiencia de la planta es del 85%. A partir de un estudio de varias grandes fundiciones, una tasa de producción media de machos se encontró que es aproximadamente de 53 kg / hora-trabajador, con una tasa de trabajo de 44 € / h.

B. Coste para producir el molde y verter el metal

Los costes del área de moldeo son más fáciles de determinar que los del área del macho, porque hay menos variaciones en el sistema de procesamiento.

El coste de procesamiento se basa en la cantidad de piezas fundidas producidas por hora, la cantidad de trabajadores necesarios para sostener la línea y una tasa de trabajo sobrecargado por trabajador.

Una línea de colada y arrastre típica requiere 21 trabajadores para lograr una tasa de producción de 285 moldes por hora.

Un estudio de fundiciones de medio tamaño sugiere que una tasa adecuada de R_{mp} para la producción de alto volumen de piezas de fundición de tamaño medio es aproximadamente de 84 €/h.

La tasa de desecho de fundición, al igual que la tasa de desecho del macho, puede variar ampliamente según la geometría de la pieza y el tipo de metal que se vierte. Un valor del 2% es razonable para la estimación de costos.

El coste de procesamiento de la línea de molde por pieza puede ser dado por

$$C_{mp} = \frac{N_{mw} * R_{mp}}{N_c * P_{mp} * \left(1 - \frac{S_m}{100}\right) * \frac{P_{ff}}{100}} = 0.4622 \text{ €/pieza}$$

donde

N_{mw} = 21, número de trabajadores de línea

R_{mp} = 84 €/h, tasa de trabajador para la producción de la línea de moldeo

N_c = 4, número de cavidades de molde

P_{mp} = 285 moldes/h, tasa de producción de la línea de moldeo

S_m = 2%, tasa de desechos de fundición

P_{ff} = 85%, eficiencia de la planta

La operación final en la línea de moldes consiste en retirar las piezas fundidas del molde. Esto generalmente se logra usando un ariete para empujar el molde de arena fuera del matraz y romper el molde. La arena del molde se recupera y las piezas fundidas se transportan al departamento de limpieza.

C. Coste para limpiar las piezas fundidas

El coste de limpiar una pieza fundida se basa principalmente en el tamaño, la geometría de la pieza, el tipo de material colado y el proceso empleado.

La limpieza de una pieza fundida es el trabajo más laborioso de la fundición. Incluso con la ayuda de la automatización para eliminar el sistema de compuerta y las incrustaciones de la pieza fundida, todavía puede haber una cantidad sustancial de trabajo manual.

Se utilizan diferentes máquinas para eliminar la rebaba y el área de contacto del sistema de alimentación. En algunos casos, el nivel de acabado de la pieza fundida no es crítico y se pueden reducir los costos.

El principal factor de coste en el proceso de limpieza es la geometría de la pieza fundida. La longitud de la línea divisoria determina la cantidad de defectos que se debe eliminar. Si la pieza tiene núcleo, también se debe quitar los defectos formados alrededor de las aberturas del núcleo en la pieza fundida. Sin embargo, otros factores también afectan el tiempo de limpieza.

Los huecos profundos y las pequeñas aberturas en una fundición también crean problemas de limpieza.

Un estudio de un gran número de piezas de fundición sugiere que el tiempo total de trabajo para limpiar las piezas de fundición (incluida la remoción de arena, el sistema de canales y la eliminación de rebabas y granallado) es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada del peso de la pieza de fundición. El análisis de regresión de los datos de fundición de una

fundición automatizada de tamaño mediano proporcionó la siguiente relación para el tiempo de trabajo de limpieza.

$$T_{cl} = 88.4 * W_p^{0.44} = 196.94 \text{ seg}$$

El coste de limpieza viene dado por

$$C_{cl} = R_{cl} * \frac{T_{cl}}{3600} = 0.3 \text{ €/pieza}$$

donde

T_{cl} = tiempo total de limpieza

R_{cl} = 22 €/h, tarifa del trabajador por la limpieza de la habitación

Las tarifas de mano de obra agobiadas por las salas de limpieza varían de aproximadamente 22 €/ h para las pequeñas fundiciones automatizadas a más del doble de ese valor para las grandes fundiciones que suministran piezas de fundición importantes a las industrias automotrices.

D.Coste total de procesado

$$C_{procesado} = C_{macho} + C_{mp} + C_{cl}$$

4.5 - Coste Total

El coste total de la pieza viene dado por la suma de los 4 costes y es de 3.60€ por cada pieza.

$$C_{total} = C_{metal} + C_{arena} + C_{herramienta} + C_{proceso} = 3.31€$$

5 - Soluciones Alternativas

En este apartado analizamos algunas posibles alternativas que podemos emplear para obtener un mejor resultado, explicando las ventajas y desventajas que cada una tiene.

En lugar de utilizar una caja de molde tradicional, podemos suponer que nuestra empresa pueda realizar un compactamiento de arena con un sistema *vertically parted flaskless* (sin caja y verticalmente partido), como se puede apreciar en **fig.5**. Este método de compactación, siendo más moderno, nos permite automatizar en manera importante esta tarea inicial de fundición, para que consigamos un ahorro significativo de tiempo y también de recursos humanos, que, eventualmente, podemos emplear en otros trabajos al mismo tiempo, pero, vuelve mucho más difícil la inserción del macho: de hecho, este sistema no admite machos (o, por lo menos, en cantidad muy baja), entonces tendremos que poner solo una pieza para molde y parar el sistema para introducir el macho cada vez.

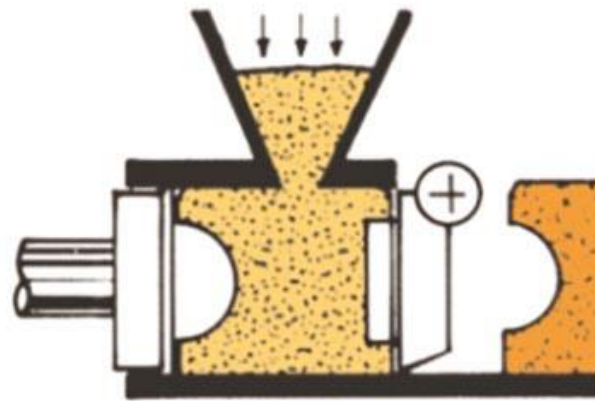


fig.5

Siendo nuestra producción bastante pequeña, hemos puesto como hipótesis la de hacer la operación de vertido manualmente, porque la automatizada suele ser empleada para fundición de piezas más grandes y de mayor cantidad. Sin embargo, podemos suponer que hacemos una colada con asistencia mecánica: de esta manera, de hecho, se pueden rellenar muchos más moldes que en el procedimiento manual, y ganar tiempo útil de trabajo.

Si suponemos que nuestra planta tenga un elevado nivel de automatización, también la tarea de rectificado se puede automatizar. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que, siendo nuestra pieza muy pequeña y con un agujero central, no es posible automatizar totalmente la parte de limpieza final (sino empleando robots muy modernos y costosos).

Si queremos obtener un acabado superficial y una precisión mejores, una alternativa es emplear arena con resina, diferente con respecto a la más empleada arena verde. A pesar de las mejores características de la pieza final, hemos que tener en cuenta que el precio de este tipo de arena es muy mayor en frente a aquella verde (porque es más rara) y, además, el proceso de fundición con arena y resina es más lento que lo tradicional, entonces subiendo el tiempo de producción suben también los costes. Informaciones y ejemplos sobre este tipología de resina se encontraron en el sitio web de la empresa de fundición Borui (<https://www.iron-foundry.com/resin-sand-casting.html>).

Optimización del número de piezas

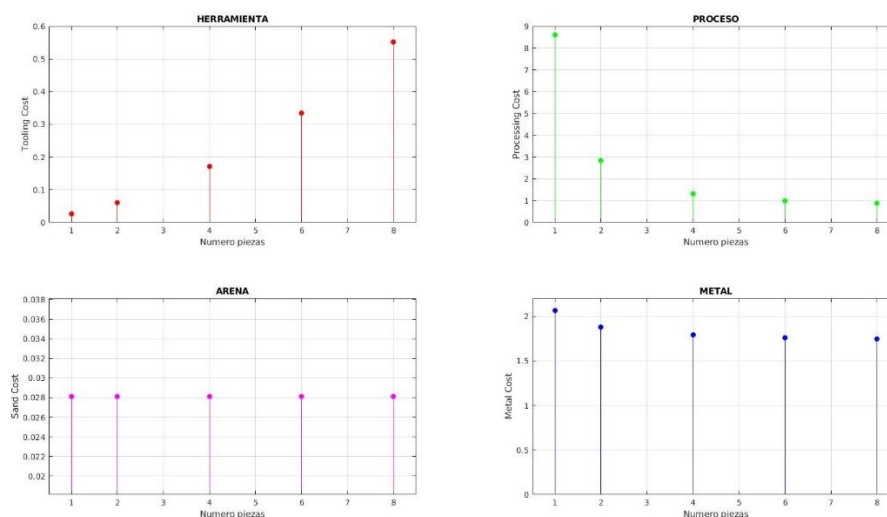


fig.6

En este apartado vamos a ver cómo cambia el coste de una pieza según la cantidad de piezas que se ponen en cada caja. Para hacer esto hemos hecho un código Matlab que calcula cada coste variando el número de piezas.

En esta primera parte en particular, vamos a ver cómo varía el costo de cada componente individual. Podemos ver que el coste de la herramienta crece de forma no lineal y el costo del proceso y del metal se reducen de forma no lineal. El coste de la arena es constante si lo evaluamos para cada pieza.

El coste del proceso es el que más influye en el coste final si vamos a hacer una caja con 1 o 2 piezas. Como hemos visto antes, C_{mp} , el costo para producir el molde y verter el metal es inversamente proporcional al número de piezas en la caja y por esto el coste de proceso va a bajar.

En **fig.6** se pueden mirar las variaciones de los valores de cada coste al crecer del número de piezas.

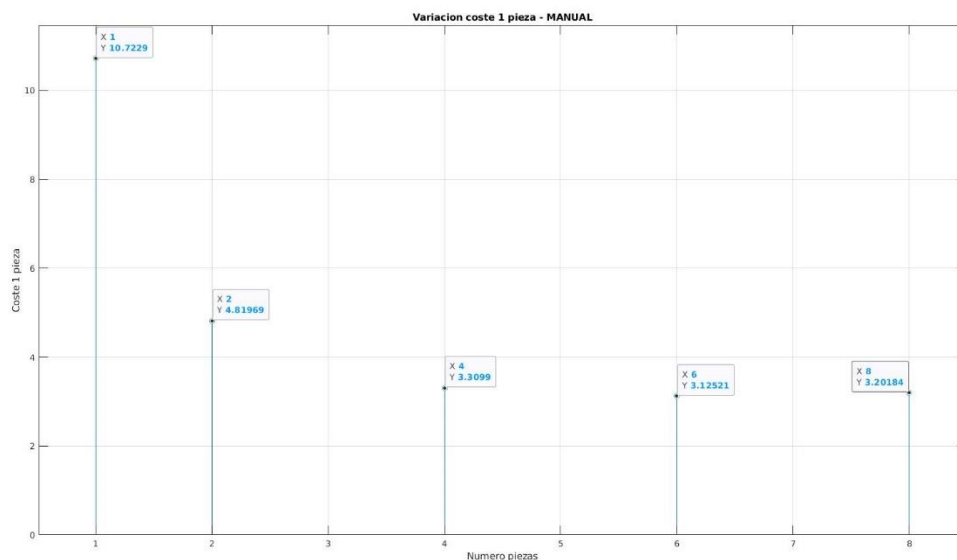


fig.7

Ahora calculamos el precio de cada pieza si ponemos 1,2,4,6 o 8 piezas en cada caja.

Si sumamos todos los costes anteriores sale este gráfico y podemos ver que el coste por cada pieza decrece inicialmente, pero va a subir al final. Entonces, como se puede mirar en **fig.7** el número óptimo de piezas por caja es 6.

Poniendo 6 piezas por cajas minimizamos el coste para producir una pieza, considerando las hipótesis elegidas.

6 - Comparación con Presupuesto Real y Conclusiones

A fin de hacer un análisis más realista posible, hemos pedido un presupuesto para la fabricación del mismo lote de piezas a una empresa de fundición italiana, denominada

SilcoMetal. Para la producción de 30 000 piezas en bronce SilcoMetal nos envió un presupuesto de 9.50 euros por unidad, a lo cual se pueden sumar entre 2 y 3 euros de ulterior mecanizado en torno, para lograr un acabado superficial apropiado. De hecho, la empresa nos advirtió que, por las dimensiones muy estrechas y por la tecnología de sus máquinas, es una tarea muy difícil producir piezas de este tamaño y sería mejor ejecutar un proceso de torneado sobre cada unidad para asegurar un resultado más limpio y preciso. La estimación del coste de proceso de torneado fue hecha comparando algunas empresas de mecanizado locales partner de SilcoMetal. En **fig.8** se muestra un resumen del presupuesto recibido.

Para entender mejor las diferencias entre el coste que estimamos y el presupuesto de SilcoMetal, tenemos que remarcar algunos asuntos: en principio, el coste bronce es mucho mayor de lo que empleamos en nuestro cálculos, debido a lo rápido crecimiento de los costes de materias primas en estos últimos años (de hecho, también factores externos a la empresa influyen sobre al coste final, como pandemias, problemas de transportes y distribución de la energía, etc...); además, hay que tener en cuenta que el precio final de la empresa ya incluye los gastos de transporte; por final, SilcoMetal es una empresa de grandes dimensiones y histórica en la producción a través de la fundición en arena y por supuesto tiene un elevado nivel de producción y automatización.

Por último, teniendo en cuenta todas estas posibles mejoras enumeradas y del ejemplo de presupuesto real, podemos concluir que nuestra estimación es bastante realista para la producción de 30 000 cojinetes en bronce tramite fundición en arena verde.

Preventivo SilcoMetal	
Fusione in terra	85/5/5/5
Quotazione	9.50 euro/cad.
Attrezzatura	Da definirsi
Rifinitura in tornio	2/3 euro/cad. (da definirsi)



fig.8

ANEXOS

A.1 - Variables no especificadas en el enunciado

- n = inicialmente 4 y después la optimización 6. Número piezas por caja;
- Precio medio electricidad en España en 2021 = 0,2226 €/kWh;
- F_{ff} = 80% Eficiencia del horno;
- S_c, S_g, S_m porcentajes de chatarra del macho del metal y tasa de desecho;
- Consumo medio eléctrico en España = 0.185 kWh/kg

A.2 - Código MATLAB

```
close all
clear all

%% DATOS
%densidad metal, kg/m^3
rho = 8800;
%precision dimensional
a = 0.0025;
%diametros
D1 = 0.05 + 2*a;
D2 = 0.044 + 2*a;
D3 = 0.04 + 2*a;
Dag = 0.03 - 2*a;
%alturas
h1 = 0.005 + a;
h2 = 0.005 + a;
h3 = 0.05 + a;
hag = 0.06 + 2*a;
%Volumen
Vfc = pi*0.25*(h1*D1^2+h2*D2^2+h3*D3^2-hag*Dag^2);
%Vfccm = Vfc * 10^6; %volumen en cm^3
%Pieza
L = hag;
W = D1;
D = D1;
%Conversion desde dolares to euros
d2e = 0.88;
%Altura macho
hm = hag +0.002;

%_____METAL_____
% minimum melt energy kWh/kg
Mme = 0.185;
%Fff eficiencia del horno (Buscar horno)
Fff = 80;
%Mme energia minima de fundicion
Ect = 0.253 * d2e; %€/kWh
%coste energia horno €/kg
Cen = Ect * Mme/(Fff/100);
%Coste del horno
%Ffc coste horno [€/m^3 metal]
Ffc = 411.88*d2e;
Cfk = Ffc/rho;
```

```

%Coste bronce
Crm = 1.65 * d2e; %euros/kg
%Crm = 8 * d2e; %euros/kg

Clk = 0.02*d2e;
Ccv = 0.55 * d2e;
Sg = 2;

% _____ ARENA _____
%Average cost for core sand $/kg
Ccs = 0.084 *d2e;
%density of core sand, kg/m^3
rocs = 1387;
%scrap rate macho, valor promedio 8%
Sc = 8;

% _____ HERRAMIENTA _____
% Rt=Tasa de fabricación de herramientas (Taller de patrones), [€/h]
Rt= 40 * d2e; %€
% Nsp=Número de parches superficiales
Nsp=12;
% Factor de entrada
Gfmanual=1;
Gfautomatizado=1.25;

%Apl=Area de la placa(cm2)
Apl1 = ((D1*100+10)*(hag*100+10)); %cm2 (usando 5 cm entre la impresión y el borde)
% Ap=Area proyectada [cm^2]
Apl=D1*h1*10000+D2*h2*10000+D3*h3*10000;
%Apl=Area de la placa(cm2)
Apl2 = ((2*D1*100+15)*(hag*100+10)); %cm2 (usando 5 cm entre la impresión y el borde)
% Ap=Area proyectada [cm^2]
Ap2=(D1*h1*10000+D2*h2*10000+D3*h3*10000)*2;
%Apl=Area de la placa(cm2)
Apl4 = ((2*D1*100+15)*(2*hag*100+15)); %cm2 (usando 5 cm entre la impresión y el
borde)
% Ap=Área proyectada [cm^2]
Ap4=(D1*h1*10000+D2*h2*10000+D3*h3*10000)*4;
%Apl=Area de la placa(cm2)
Apl6 = ((3*D1*100+20)*(2*hag*100+15)); %cm2 (usando 5 cm entre la impresión y el
borde)
% Ap=Área proyectada [cm^2]
Ap6=(D1*h1*10000+D2*h2*10000+D3*h3*10000)*6;
%Apl=Area de la placa(cm2)
Apl8 = ((3*D1*100+20)*(3*hag*100+20)); %cm2 (usando 5 cm entre la impresión y el
borde)
% Ap=Area proyectada [cm^2]
Ap8=(D1*h1*10000+D2*h2*10000+D3*h3*10000)*8;

Apl = [Apl1 Apl2 0 Apl4 0 Apl6 0 Apl8];
Ap = [Ap1 Ap2 0 Ap4 0 Ap6 0 Ap8];

%MACHOS
% Rt=Tasa de fabricación de herramientas (Taller de patrones),[$/h]
Rtmacho= 40 * d2e;
% Nsp=Número de parches superficiales
Nspmacho=3;
%Np=Número de piezas
Np= 30000;

```



```

%1 machos
Aplmacho1=(Dag*100+(2*3))*(hm*100+(2*3));
% Ap=Ãrea proyectada [cm^2]
Apmacho1=Dag*hm*10000;
%2 macho
Aplmacho2=(Dag*100+(3*3))*(hm*100+(2*3));
% Ap=Ãrea proyectada [cm^2]
Apmacho2=Dag*hm*10000*2;
%4 machos
Aplmacho4=(Dag*100+(5*3))*(hm*100+(2*3));
% Ap=Ãrea proyectada [cm^2]
Apmacho4=Dag*hm*10000*4;
%6 machos
Aplmacho6=(Dag*100+(7*3))*(hm*100+(2*3));
% Ap=Ãrea proyectada [cm^2]
Apmacho6=Dag*hm*10000*6;
%8 machos
Aplmacho8=(Dag*100+(9*3))*(hm*100+(2*3));
% Ap=Ãrea proyectada [cm^2]
Apmacho8=Dag*hm*10000*8;

%vectores
Aplmacho = [Aplmacho1 Aplmacho2 0 Aplmacho4 0 Aplmacho6 0 Aplmacho8];
Apmacho = [Apmacho1 Apmacho2 0 Apmacho4 0 Apmacho6 0 Apmacho8];

% _____ PROCESO _____
%Density of core sand kg/m^3
rho_cs = 16000 ;
%Plant efficiency, % (actual production time/ total available time)*100
P_ff = 85 ;
%Worker rate for core making, $/h
R_cm = 50 * d2e;
% Core production rate, kg/h
P_cm = 53 ;
%Scrap rate (from 4% for a simple core to 40% for a very delicate core)
S_c = 8 ;
%Number of line workers
N_mw = 21 ;
%Worker rate for molding line production $/h (for high-volume production of small to
medium-sized castings)
R_mp = 95*d2e;
%Number of molding cavities
N_c = 1 ;
%Molding line production rate molds/h
P_mp = 285 ;
%Casting scrap rate %
S_m = 2 ;
%Plant efficiency %
P_ff = 85 ;

%% TOTAL COST

for i=1:8;

    % i = numero de piezas en 1 caja

```

```
%metal fundido para producir n_piezas
Wp = i * (rho*Vfc*[1+1.9*((L+W)/D)^(-0.701)]);
%Volumen de n_piezas machos
Vc = i * (pi*0.25*Dag^2*hm);
%Number of molding cavities
N_c = i;

%METAL
%Coste del metal "at the spout"
Cms = Crm+Cen+Cfk+Clk;
%Coste total metal de 1 pieza en 1 CAJA CON "n_piezas" PIEZAS
Cmf(i) = ((Cms*Wp-Ccv*(Wp-rho*Vfc))/(1-Sg/100)) / i;

% PROCESO
C_core(i) = rho_cs * Vc * R_cm / (P_cm * (1 - S_c/100)*(P_ff/100));

C_mp(i) = N_mw * R_mp / (N_c*P_mp*(1-S_m/100)*(P_ff/100));

R_cl = 25 * d2e;
T_cl(i) = 88.4 * Wp ^ (0.44);
C_cl(i) = R_cl * T_cl(i) / 3600;
%Coste total proceso de 1 pieza en 1 CAJA CON i PIEZAS
C_proce(i) = (C_core(i) + C_mp(i) + C_cl(i))/i;

%ARENA
%1 CAJA CON n_piezas PIEZA
%Cost of mold sand per part €
Cmsd = 0.018*Wp * d2e;
%Coste 1 CAJA CON 1 PIEZA
%Cost of core sand for producing a casting
Ccscd = rocs*Vc*Ccs/(1-Sc/100);

%Coste arena de 1 pieza en 1 CAJA CON i PIEZAS
C_arena(i) = (Ccscd + Cmsd)/i;

%HERRAMIENTA
%piezas
Cpm(i)= 0.58 * Apl(i) * d2e; %€
Npi = i;
Cpi(i)=Rt*(0.313*(Nsp^1.27)+0.085*(Ap(i)^1.2))*Npi^0.7;
Cptmanual(i)=Gfmanual*(Cpm(i)+Cpi(i));
Cptautomatizado(i)=Gfautomatizado*(Cpm(i)+Cpi(i));

%machos
Cpmmacho(i)= 0.58 * Aplmcho(i) * d2e;
Npimacho = i;
Cpimacho(i)=Rtmacho*(0.313*(Nspspmacho^1.27)+0.085*(Apspmacho(i)^1.2))*Npimacho^
0.7;
Cbox(i)=Cpmmacho(i)+Cpimacho(i);

%herramienta
Ctlmanual(i)=[(Cptmanual(i)+Cbox(i))/Np];
Ctlautomatizado(i)=[(Cptautomatizado(i)+Cbox(i))/Np];

%
% COSTE 1 PIEZA
C_lpieza manual(i) = Cmf(i) + C_arena(i) + C_proce(i) + Ctlmanual(i);
```

```

        C_lpieza_automatizado(i)    =    Cmf(i)    +    C_arena(i)    +    C_proce(i)    +
Ctlautomatizado(i);

end

x = [1 2 4 6 8];

Cmf = [Cmf(1) Cmf(2) Cmf(4) Cmf(6) Cmf(8)];
C_proce = [C_proce(1) C_proce(2) C_proce(4) C_proce(6) C_proce(8)];
C_arena = [C_arena(1) C_arena(2) C_arena(4) C_arena(6) C_arena(8)];

Ctlmanual = [Ctlmanual(1) Ctlmanual(2) Ctlmanual(4) Ctlmanual(6) Ctlmanual(8)];
Cptautomatizado = [Cptautomatizado(1) Cptautomatizado(2) Cptautomatizado(4)
Cptautomatizado(6) Cptautomatizado(8)];

C_lpieza_manual = [C_lpieza_manual(1) C_lpieza_manual(2) C_lpieza_manual(4)
C_lpieza_manual(6) C_lpieza_manual(8)];
C_lpieza_automatizado = [C_lpieza_automatizado(1) C_lpieza_automatizado(2)
C_lpieza_automatizado(4) C_lpieza_automatizado(6) C_lpieza_automatizado(8)];

% figure(1);
% stem(x, C_lpieza_automatizado, 'filled');
% title('Variacion coste 1 pieza - AUTOMATIZADO')
% xlabel('Numero piezas')
% ylabel('Coste 1 pieza')
% grid on
% axis padded

figure(2);
stem(x, C_lpieza_manual, 'filled');
title('Variacion coste 1 pieza - MANUAL')
xlabel('Numero piezas')
ylabel('Coste 1 pieza')
grid on
axis padded

figure(3);
subplot(2,2,1)
stem(x, Ctlmanual, 'filled', 'Color', 'r');
title('HERRAMIENTA')
xlabel('Numero piezas')
ylabel('Tooling Cost')
grid on
axis padded

subplot(2,2,2)
stem(x, C_proce, 'filled', 'Color', 'g');
title('PROCESO')
xlabel('Numero piezas')
ylabel('Processing Cost')
grid on
axis padded

subplot(2,2,3)
stem(x, C_arena, 'filled', 'Color', 'm');
title('ARENA')

```

```
xlabel('Numero piezas')
ylabel('Sand Cost')
grid on
axis padded

subplot(2,2,4)
stem(x, Cmf, 'filled', 'Color', 'b');
title('METAL')
xlabel('Numero piezas')
ylabel('Metal Cost')
grid on
axis padded
```