

PROCESOS DE FABRICACIÓN

COLECCIÓN MONOGRAFÍAS DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DIRECTOR DE LA COLECCIÓN

Sáez Pérez, Andrés. Universidad de Sevilla

CONSEJO DE REDACCIÓN

Arahal Junco, Consuelo. Universidad de Sevilla

Estepa Alonso, Antonio. Universidad de Sevilla

Limón Marruedo, Daniel. Universidad de Sevilla

Rodríguez Luis, Alejandro José. Universidad de Sevilla

Sáez Pérez, Andrés. Universidad de Sevilla

Salas Gómez, Francisco. Universidad de Sevilla

COMITÉ CIENTÍFICO

Aracil Santonja, Javier. Universidad de Sevilla y Universidad de Málaga

Bernelli Zazzera, Franco. Politecnico di Milano

Chinesta, Francisco. École Centrale de Nantes

Félez Mindan, Jesús. Universidad Politécnica de Madrid

Gallego Sevilla, Rafael. Universidad Politécnica de Madrid

García-Lomas Jung, Francisco Javier. Universidad de Sevilla

Giner Maravilla, Eugenio. Universidad Politécnica de Valencia

González Díez, Isabel. Universidad de Sevilla

Montañés García, José Luis. Universidad Politécnica de Madrid

Montes Martos, Juan Manuel. Universidad de Sevilla

Navarro Esteve, Pablo José. Universidad Politécnica de Valencia

Ollero de Castro, Pedro. Universidad de Sevilla

Verdú, Sergio. Princeton University

Petr Urban
Fátima Ternero Fernández
Eduardo Sánchez Caballero
Raquel Astacio López

PROCESOS DE FABRICACIÓN

Problemas resueltos. Metrología, moldeo,
pulvimetalurgia y deformación plástica

 **EUS** EDITORIAL
UNIVERSIDAD DE SEVILLA

 Escuela Técnica Superior de
INGENIERÍA DE SEVILLA

SEVILLA 2025

Colección: Monografías de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería
de la Universidad de Sevilla

Núm.: 31

Comité editorial de
la Editorial Universidad de Sevilla:

Araceli López Serena
(Directora)

Elena Leal Abad
(Subdirectora)

Concepción Barrero Rodríguez

Rafael Fernández Chacón

María Gracia García Martín

María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado

Manuel Padilla Cruz

Marta Palenque

María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda

Marina Ramos Serrano

José-Leonardo Ruiz Sánchez

Antonio Tejedor Cabrera

Motivo de cubierta: Fundición en molde permanente

© Editorial Universidad de Sevilla 2025

C/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.

Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451

Correo electrónico: info-eus@us.es

Web: <https://editorial.us.es>

© Petr Urban, Fátima Ternero Fernández

Eduardo Sánchez Caballero y Raquel Astacio López 2025

Impreso en papel ecológico

Impreso en España-Printed in Spain

ISBN 978-84-472-3140-9

Depósito Legal: SE 828-2025

Diseño de cubierta: Santi García Hernández

Diseño de maquetación: Francisco Javier Payan Somet

Maquetación: Petr Urban

Impresión: Podiprint

Resumen

Este libro nace de la necesidad de completar el material didáctico disponibles para nuestro alumnado y así poder complementar e interrelacionar los conceptos teóricos de la asignatura con los ejercicios prácticos.

Este libro de problemas está indicado como una herramienta de estudio para estudiantes universitarios de los Grados de Ingeniería Mecánica, Química, Eléctrica, Electrónica y de Materiales que cursan la asignatura de Procesos de Fabricación.

Se tratan los aspectos más importantes de los procesos de fabricación desde la metrología pasando por los procesos de fabricación por moldeo, además de estudiar los procesos pulvimetalúrgicos y los diferentes tipos de fabricación por deformación plástica. Cada uno de los diferentes apartados del libro presentan problemas solucionados, los más característicos de cada uno de los temas, siempre dándole una cierta orientación industrial.

Con este libro se pretende que los estudiantes entiendan y comprendan el papel fundamental de los procesos y la tecnología de fabricación en Ingeniería.

La fe de erratas del libro se puede consultar en:

<https://personal.us.es/purban/fedeerratas/fabricacion1.html>

o utilizando siguiente código QR.



Índice

Resumen	vii
Índice	ix
1. Metrología	1
2. Moldeo	19
2.1. Solidificación	20
2.2. Moldeo en Arena	39
2.3. Fundición Centrífuga	46
3. Pulvimetalurgia	51
4. Deformación Plástica	67
4.1. Forja	72
4.2. Laminación	77
4.3. Extrusión	84
4.4. Estirado	94
4.5. Operaciones de corte	100
4.6. Embutido	102
Referencias	107
Anexo I: Constantes Físicas	109
Anexo II: Prefijos de SI	110
Anexo III: Alfabeto Griego	111
Anexo IV: Conversión de Unidades	112
Anexo V: Conversión de Unidades al Sistema Internacional (SI)	113
Anexo VI: Tolerancias y Calidades	114
Contacto	121

1. METROLOGÍA

La metrología es la Ciencia de la medición. Establece una comprensión de las unidades, crucial para vincular diferentes actividades humanas. La metrología moderna tiene sus raíces en Francia, cuando se propuso un estándar de longitud y la creación del sistema métrico basado en decimales en 1795, estableciendo un conjunto de estándares para otros tipos de mediciones. Para garantizar la conformidad entre los países se estableció en el año 1875 la organización mundial de metrología, el Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) y en 1960 se creó en el Sistema Internacional de Unidades (SI) constituido por siete unidades básicas: metro, kilogramo, segundo, kelvin, mol, amperio y candela.

Este capítulo se va a centrar en:

- La definición del metro
- La capacidad del proceso
- La medición y calibración del calibre y micrómetro
- La posición y calidad de tolerancia.

Problema 01: Definición del metro

Compruebe si las definiciones del metro son correctas.

- a) Definición del metro establecida en la Academia de Ciencias de París en 1791:
“El metro es la diezmillonésima parte del cuadrante de un meridiano terrestre”.
- b) Definición del metro establecida en la 11ª CGPM en 1960:
“El metro es la longitud igual a 1 650 763.73 longitudes de onda de la radiación emitida por el salto cuántico entre los niveles 2p₁₀ y 2d₅ del átomo de kriptón 86”.
- c) Definición del metro establecida en la 17ª CGPM¹ en 1983:
“El metro es la longitud del trayecto recorrido en el vacío por la luz durante un tiempo de 1/299 792 458 de segundo”.
- d) ¿Qué definición es la más exacta? Justifique la respuesta.

Datos: La velocidad de luz es 1 079 252 848.8 km/h.

Longitud de salto entre los niveles 2p₁₀ y 2d₅ del kriptón es $6.0578 \cdot 10^{-7}$ m.

Radio medio de la Tierra es 6 371.0 km.

Solución.

$c_0 = 1\,079\,252\,848.8 \text{ km/h} = 299\,792\,458 \text{ m/s} = \text{velocidad de luz.}$

$L_{Kr} = 605.78 \text{ nm} = 6.0578 \cdot 10^{-7} \text{ m} = \text{longitud de salto entre los niveles } 2p_{10} \text{ y } 2d_5 \text{ del Kr.}$

$r_t = 6\,371.0 \text{ km} = 6.371 \cdot 10^6 \text{ m} = \text{radio medio de la Tierra.}$

- a) El metro definido con meridiano terrestre:

Longitud del meridiano terrestre:

$$L_{mt} = 2\pi r_t = 2\pi \cdot (6.371 \cdot 10^6) [m] = 40\,030\,173.6 \text{ m}$$

Longitud de un cuadrante de un meridiano terrestre:

$$L_{mt/4} = \frac{40\,030\,173.6 [m]}{4} = 10\,007\,543.4 \text{ m}$$

Longitud de una diezmillonésima parte del cuadrante de un meridiano terrestre:

¹ CGPM, Conferencia General de Pesas y Medidas, (en francés: Conférence Générale des Poids et Mesures) decide sobre todos los problemas principales relacionados con la organización y el desarrollo del BIPM, Oficina Internacional de Pesas y Medidas, (en francés: Bureau International des Poids et Mesures).

$$L_{(1\ m)} = \frac{10\ 007\ 543.4[m]}{10\ 000\ 000} = \mathbf{1.00075\ m}$$

b) El metro definido con kriptón 86:

$$L_{(1\ m)} = 1\ 650\ 763.73 \cdot (6.0578 \cdot 10^{-7})[m] = \mathbf{0.9999997\ m}$$

c) El metro definido con velocidad de luz:

$$L_{(1\ m)} = t \cdot c_0 = \frac{1}{299\ 792\ 458}[s] \cdot 299\ 792\ 458 \left[\frac{m}{s}\right] = \mathbf{1.0000000\ m}$$

d) La definición más precisa es utilizando haz de luz.

La definición con kriptón introduce un error de 300 nm por un metro.

La definición con meridiano terrestre introduce un error de 750 μm por un metro.

Problema 02: Capacidad del proceso 1

En una línea de producción el producto tiene los límites de especificación superior e inferior de 104 μm y 90 μm , respectivamente. Se ha determinado, que la desviación estándar estimada y la media estimada del proceso son 1.08 μm y 98.12 μm , respectivamente. Determine:

- La tolerancia natural del proceso, TNP .
- La capacidad de proceso centrado, C_p .
- La capacidad de proceso para el límite superior, $C_{p, superior}$.
- La capacidad de proceso para el límite inferior, $C_{p, inferior}$.
- La capacidad de proceso entre límite superior e inferior, C_{pk} .
- La capacidad de proceso respecto al objetivo T , C_{pm} .
- La capacidad de proceso respecto al objetivo T , con la media descentrada, C_{pkm} .
- Indique, que tipos de capacidades de procesos son aceptables. Justifique la respuesta.

Solución.

$USL = 104\ \mu\text{m}$ = límite superior de la tolerancia (upper specification limit).

$LSL = 90\ \mu\text{m}$ = límite inferior de la tolerancia (lower specification limit).

$\sigma = 1.08\ \mu\text{m}$ = desviación estándar estimada.

$\mu = 98.12\ \mu\text{m}$ = media estimada del proceso.

a) La tolerancia natural del proceso, TNP .

$$TNP = \mu \pm 3\sigma = 98.12[\mu m] \pm (3 \cdot 1.08)[\mu m] = \mathbf{98.12 \pm 3.24 \mu m}$$

b) La capacidad de proceso centrado, C_p :

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{(104 - 90)[\mu m]}{6 \cdot 1.08[\mu m]} = \mathbf{2.16}$$

c) La capacidad de proceso para el límite superior, $C_{p, superior}$:

$$C_{p, superior} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} = \frac{(104 - 98.12)[\mu m]}{3 \cdot 1.08[\mu m]} = \mathbf{1.82}$$

d) La capacidad de proceso para el límite inferior, $C_{p, inferior}$:

$$C_{p, inferior} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} = \frac{(98.12 - 90)[\mu m]}{3 \cdot 1.08[\mu m]} = \mathbf{2.51}$$

e) La capacidad de proceso entre límite superior e inferior, C_{pk} :

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right]$$

$$C_{pk} = \min \left[\frac{(104 - 98.12)[\mu m]}{3 \cdot 1.08[\mu m]}; \frac{(98.12 - 90)[\mu m]}{3 \cdot 1.08[\mu m]} \right] = \min[1.82; 2.51] = \mathbf{1.82}$$

f) La capacidad de proceso respecto al objetivo T , C_{pm} :

$$T = \frac{USL + LSL}{2} = \frac{(104 + 90)[\mu m]}{2} = \mathbf{97 \mu m}$$

$$C_{pm} = \frac{C_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu - T}{\sigma}\right)^2}} = \frac{2.16}{\sqrt{1 + \left(\frac{(98.12 - 97)[\mu m]}{1.08[\mu m]}\right)^2}} = \mathbf{1.50}$$

g) La capacidad de proceso respecto al objetivo T , con una media descentrada, C_{pkm} :

$$C_{pkm} = \frac{C_{pk}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu - T}{\sigma}\right)^2}} = \frac{1.82}{\sqrt{1 + \left(\frac{(98.12 - 97)[\mu m]}{1.08[\mu m]}\right)^2}} = \mathbf{1.26}$$

h) Todas las capacidades de procesos > 1 , por lo cual son aceptables.

Problema 03: Capacidad del proceso 2

En una línea de producción por cada 100 piezas se recoge una para determinar su longitud. En total se han fabricado 2 000 piezas por lo que hay disponibles medidas de 20 piezas. Los valores de las mediciones están en la siguiente tabla:

n.º	μm	n.º	μm	n.º	μm	n.º	μm
1	60.55	6	62.35	11	63.40	16	63.00
2	62.35	7	62.70	12	62.15	17	62.70
3	61.30	8	61.50	13	61.90	18	61.85
4	63.50	9	60.20	14	60.60	19	62.85
5	62.30	10	60.35	15	62.60	20	60.05

Determine:

- Para los límites de especificación superior ($63 \mu\text{m}$) e inferior ($59 \mu\text{m}$) y
- para los límites de especificación superior ($65 \mu\text{m}$) e inferior ($57 \mu\text{m}$):
 - la media estimada del proceso, μ .
 - la desviación estándar estimada, σ .
 - la capacidad de proceso centrado², C_p .
 - la capacidad de proceso para el límite superior³, $C_{p, \text{superior}}$.
 - la capacidad de proceso para el límite inferior⁴, $C_{p, \text{inferior}}$.
 - la capacidad de proceso entre límite superior e inferior⁵, C_{pk} .
 - la capacidad de proceso respecto al objetivo T ⁶, C_{pm} .
 - la capacidad de proceso respecto al objetivo T con una media descentrada⁷, C_{pkm} .
- Dibuje un gráfico indicando las 20 mediciones, media estimada del proceso, μ , desviación estándar estimada, σ , media objetivo, T , y límite inferior, LSL , y superior, USL , de la tolerancia del apartado a y b.

² Calcula lo que el proceso es capaz de producir si el proceso está centrado.

³ Calcula la capacidad del proceso para especificaciones únicamente con un límite superior.

⁴ Calcula la capacidad del proceso para especificaciones únicamente con un límite inferior.

⁵ Calcula lo que el proceso es capaz de producir si el objetivo, T , del proceso está centrado entre los límites de la especificación.

⁶ Calcula lo que el proceso es capaz de producir si el objetivo, T , del proceso no está centrado entre los límites de la especificación.

⁷ Calcula lo que el proceso es capaz de producir si el objetivo, T , del proceso no está centrado entre los límites de la especificación, tomando el límite mínimo como referencia.

d) Indique, que tipos de capacidades de procesos y que límites de especificación son aceptables. Justifique la respuesta.

Solución.

$USL = 63 \mu m$ (para a) = límite superior de la tolerancia.

$LSL = 59 \mu m$ (para a) = límite inferior de la tolerancia.

$USL = 65 \mu m$ (para b) = límite superior de la tolerancia.

$LSL = 57 \mu m$ (para b) = límite inferior de la tolerancia.

La media estimada del proceso, μ , y la desviación estándar estimada, σ , son independientes de los límites de especificación.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{60.55 + \dots + 60.05}{20} = 61.91 \mu m$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} = \sqrt{\frac{(60.55 - 61.91)^2 + \dots + (60.05 - 61.91)^2}{20}} = 1.05 \mu m$$

a) Capacidades de procesos para los límites de especificación de $63 \mu m$ a $59 \mu m$.

La capacidad de proceso centrado, C_p :

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{63[\mu m] - 59[\mu m]}{6 \cdot 1.05[\mu m]} = 0.64$$

La capacidad de proceso para el límite superior, $C_{p, superior}$:

$$C_{p, superior} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} = \frac{63[\mu m] - 61.91[\mu m]}{3 \cdot 1.05[\mu m]} = 0.35$$

La capacidad de proceso para el límite inferior, $C_{p, inferior}$:

$$C_{p, inferior} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} = \frac{61.91[\mu m] - 59[\mu m]}{3 \cdot 1.05[\mu m]} = 0.92$$

La capacidad de proceso entre límite superior e inferior, C_{pk} :

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right]$$

$$C_{pk} = \min \left[\frac{63[\mu m] - 61.91[\mu m]}{3 \cdot 1.05[\mu m]}; \frac{61.91[\mu m] - 59[\mu m]}{3 \cdot 1.05[\mu m]} \right] = \min[0.35; 0.921]$$

$$C_{pk} = \mathbf{0.35}$$

La capacidad de proceso respecto al objetivo T , C_{pm} :

$$T = \frac{USL + LSL}{2} = \frac{63[\mu m] + 59[\mu m]}{2} = \mathbf{61 \mu m}$$

$$C_{pm} = \frac{C_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu - T}{\sigma}\right)^2}} = \frac{0.64}{\sqrt{1 + \left(\frac{61.91[\mu m] - 61[\mu m]}{1.05[\mu m]}\right)^2}} = \mathbf{0.48}$$

La capacidad de proceso respecto al objetivo T , con una media descentrada, C_{pkm} :

$$C_{pkm} = \frac{C_{pk}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu - T}{\sigma}\right)^2}} = \frac{0.35}{\sqrt{1 + \left(\frac{61.91[\mu m] - 61[\mu m]}{1.05[\mu m]}\right)^2}} = \mathbf{0.26}$$

b) Capacidades de procesos para los límites de especificación de 65 μm a 57 μm .

La capacidad de proceso centrado, C_p :

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{65[\mu m] - 57[\mu m]}{6 \cdot 1.05[\mu m]} = \mathbf{1.27}$$

La capacidad de proceso para el límite superior, $C_{p, superior}$:

$$C_{p, superior} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} = \frac{65[\mu m] - 61.91[\mu m]}{3 \cdot 1.05[\mu m]} = \mathbf{0.98}$$

La capacidad de proceso para el límite inferior, $C_{p, inferior}$:

$$C_{p, inferior} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} = \frac{61.91[\mu m] - 57[\mu m]}{3 \cdot 1.05[\mu m]} = \mathbf{1.56}$$

La capacidad de proceso entre límite superior e inferior, C_{pk} :

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right]$$

$$C_{pk} = \min \left[\frac{65 - 61.91}{3 \cdot 1.058}; \frac{61.91 - 57}{3 \cdot 1.05} \right] = \min[0.98; 1.56] \rightarrow C_{pk} = \mathbf{0.98}$$

La capacidad de proceso respecto al objetivo T , C_{pm} :

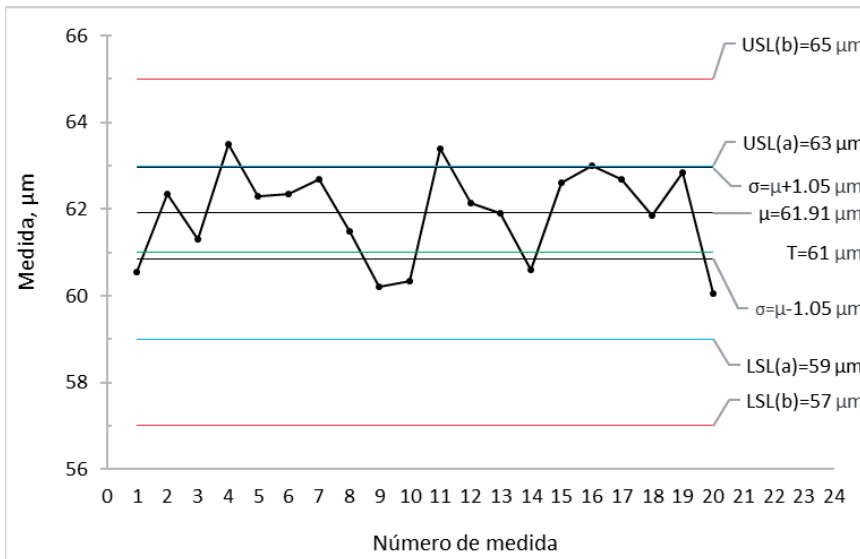
$$T = \frac{USL + LSL}{2} = \frac{65[\mu m] + 57[\mu m]}{2} = 61 \mu m$$

$$C_{pm} = \frac{C_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu - T}{\sigma}\right)^2}} = \frac{1.27}{\sqrt{1 + \left(\frac{61.91[\mu m] - 61[\mu m]}{1.05[\mu m]}\right)^2}} = 0.96$$

La capacidad de proceso respecto al objetivo T , con una media descentrada, C_{pk} :

$$C_{pk} = \frac{C_{pk}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\mu - T}{\sigma}\right)^2}} = \frac{0.98}{\sqrt{1 + \left(\frac{61.91[\mu m] - 61[\mu m]}{1.05[\mu m]}\right)^2}} = 0.74$$

- c) Gráfico indicando las 20 mediciones, media estimada del proceso, μ , desviación estándar estimada, σ , media objetivo, T , y límite inferior, LSL , y superior, USL , de la tolerancia.



- d) Para que un proceso de fabricación sea aceptable, su valor tiene que ser > 1 . Para los límites de especificación entre 59 y 63 μm , no hay ningún proceso de fabricación aceptable.

Para los límites de especificación entre 57 y 65 μm , es aceptable el proceso de fabricación centrado y del límite inferior.

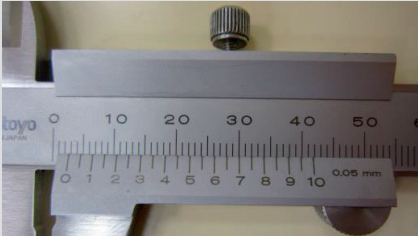
Problema 04: Medición con calibre y micrómetro

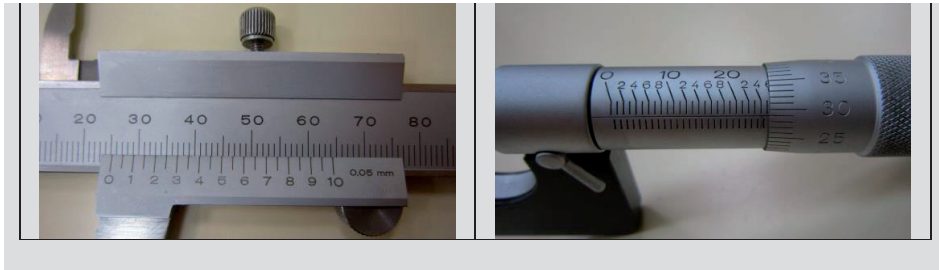
Se ha medido el espesor, altura y diámetro exterior de una pieza cilíndrica hueca con calibre y micrómetro.

¿Cuál es la apreciación del (a) calibre y del (b) micrómetro?

Determine los valores de las medidas del (c) calibre y del (d) micrómetro.

(e) Dibuje el esquema de la pieza indicando las medidas.

Medida de espesor	
con calibre 	con micrómetro 
Medida de altura	
con calibre 	con micrómetro 
Medida de diámetro	
con calibre	con micrómetro



Solución.

$D_c = 1 \text{ mm}$ = separación entre 2 divisiones sucesivas de la regla fija del calibre.

$D_m = 0.5 \text{ mm}$ = separación entre 2 divisiones sucesivas de la regla fija del micrómetro.

$N_c = 20$ = número de divisiones del nonio del calibre.

$N_m = 50$ = número de divisiones del nonio del micrómetro.

a) La apreciación del calibre:

$$P_c = \frac{D_c}{N_c} = \frac{1[\text{mm}]}{20} = 0.05 \text{ mm}$$

b) La apreciación del micrómetro:

$$P_m = \frac{D_m}{N_m} = \frac{0.5[\text{mm}]}{50} = 0.01 \text{ mm}$$

c) Medidas con calibre con una apreciación de 0.05 mm.

Espesor: El cero en el nonius indica 2 mm enteros en la regla fija. Además, un valor de la regla fija coincide con el valor 7.5 del nonius que corresponde a 0.75 mm. La suma de $2 + 0.75$ da como resultado **2.75 mm**.

Altura: El cero en el nonius indica 19 mm enteros en la regla fija. Además, un valor de la regla fija coincide con el valor 8.5 del nonius que corresponde a 0.85 mm. La suma de $19 + 0.85$ da como resultado **19.85 mm**.

Diámetro exterior: El cero en el nonius indica 25 mm enteros en la regla fija. Además, un valor de la regla fija coincide con el valor 3.0 del nonius que corresponde a 0.30 mm. La suma de $25 + 0.30$ da como resultado **25.30 mm**.

d) Medidas con micrómetro con una apreciación de 0.01 mm.

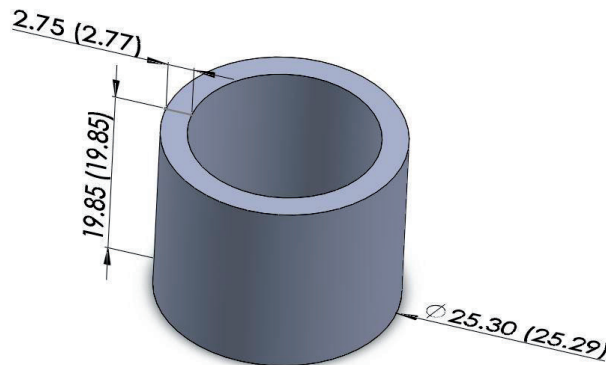
Espesor: En la parte superior de la regla fija están visibles 2 mm. Además, en la parte inferior de la regla fija están visibles 0.5 mm. Por otro lado, el valor 27 del nonius coincide con la línea horizontal de la regla fija que corresponde a 0.27 mm. La suma

de $2 + 0.5 + 0.27$ da como resultado **2.77 mm**.

Altura: En la parte superior de la regla fija están visibles 19 mm. Además, en la parte inferior de la regla fija están visibles 0.5 mm. Por otro lado, el valor 35 del nonius coincide con la línea horizontal de la regla fija que corresponde a 0.35 mm. La suma de $19 + 0.5 + 0.35$ da como resultado **19.85 mm**.

Diámetro exterior: En la parte superior de la regla fija están visibles 25 mm. Además, en la parte inferior de la regla fija están visibles 0.0 mm. Por otro lado, el valor 29 del nonius coincide con la línea horizontal de la regla fija que corresponde a 0.29 mm. La suma de $25 + 0.0 + 0.29$ da como resultado **25.29 mm**.

e) Esquema de la pieza medida con calibre y con micrómetro entre parentesis.



Problema 05: Calibración del micrómetro

Realice la calibración de un micrómetro y determine:

- Valor medio de la calibración para estimar la repetibilidad, $\bar{x}_l$.
- Corrección de calibración, C_{ci} .
- Desviación típica de calibración, s_i .
- Incertidumbre del patrón, u_p .
- Incertidumbre por repetibilidad, u_r .
- Incertidumbre típica, u_i .
- Incertidumbre expandida, U , para una probabilidad de cobertura, k , del 68%, 95% y 99%.

Datos: Se utiliza un juego de bloques patrón longitudinales (BLP) de grado 2 de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 3650:2000.

Se toman 10 medidas reiteradas a partir de un patrón de valor 9.8 mm.

n_i	$x_i [mm]$	n_i	$x_i [mm]$	n_i	$x_i [mm]$
1	9.80	5	9.81	9	9.80
2	9.81	6	9.80	10	9.81
3	9.81	7	9.81		
4	9.81	8	9.81		

Factor de cobertura, k , es 1, 2 y 3 para coberturas de 68%, 95% y 99%, respectivamente.

Solución.

$n_c = 10$ = número de medidas reiteradas.

$x_0 = 9.8 \text{ mm}$ = longitud del patrón.

$k_{68\%}$, $k_{95\%}$ y $k_{99\%}$, = 1, 2 y 3 = factor de cobertura para incertidumbre expandida con una probabilidad de cobertura del 68%, 95% y 99%.

- a) El valor medio de la calibración para estimar la repetibilidad, $\bar{x}_i$, es el valor medio de una determinada cantidad de mediciones de la misma longitud.

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} x_i$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{10} (9.80 + 9.81 + \dots + 9.80 + 9.81) = \mathbf{9.807 \text{ mm}}$$

- b) La corrección de calibración, c_{ci} , compensa los errores de tipo sistemático que permanecen constantes entre dos calibraciones sucesivas.

$$c_{ci} = x_0 - \bar{x}_i = 9.8 - 9.807 = \mathbf{-0.007 \text{ mm}}$$

- c) La desviación típica de calibración, s_i , es incertidumbre de la dispersión de los valores:

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n_c - 1} \sum_{i=1}^{n_c} (x_i - \bar{x}_i)^2}$$

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{10 - 1} ((9.8 - 9.807)^2 + \dots + (9.81 - 9.807)^2)} = \mathbf{0.00483 \text{ mm}}$$

- d) La incertidumbre del patrón, u_p , se determina de la Tabla 06 (página 114). Para la

longitud nominal entre 0.5 y 10 mm y para el grado 2 se escoge la máxima desviación de longitud, t_e , permitida en cualquier punto de la cara de medida respecto a la longitud nominal. Luego, $u_p = 0.45 \mu\text{m} = 0.00045 \text{ mm}$.

- e) La incertidumbre por repetibilidad, u_r , se evalúa con el estimador estadístico de la desviación típica de la media a partir de mediciones repetidas en un punto, considerando que la distribución es normal:

$$u_r = \frac{s_i}{\sqrt{n_c}} = \frac{0.00483}{\sqrt{10}} = 0.00153 \text{ mm}$$

- f) La incertidumbre típica, u_t , está asociada a la determinación de la corrección en cada punto c_i :

$$u_t = \sqrt{u_p^2 + \frac{s_i^2}{n_c}} = \sqrt{0.00045^2 + \frac{0.00483^2}{10}} = 0.00159 \text{ mm}$$

- g) La incertidumbre expandida, U , para la corrección de cada punto calibrado:

Para una probabilidad de cobertura del 68% el factor de cobertura, k , es 1.

$$U = k_{68\%} \cdot u_t = 1 \cdot 0.00159 = 0.00159 \text{ mm} = 0.002 \text{ mm}$$

El resultado es $9.800 \pm 0.002 \text{ mm}$ para factor de cobertura igual a 1.

Para una probabilidad de cobertura del 95% el factor de cobertura, k , es 2.

$$U = k_{95\%} \cdot u_t = 2 \cdot 0.00159 = 0.00318 \text{ mm} = 0.003 \text{ mm}$$

El resultado es $9.800 \pm 0.003 \text{ mm}$ para factor de cobertura igual a 2.

Para una probabilidad de cobertura del 99% el factor de cobertura, k , es 3.

$$U = k_{99\%} \cdot u_t = 3 \cdot 0.00159 = 0.00477 \text{ mm} = 0.005 \text{ mm}$$

El resultado es $9.800 \pm 0.005 \text{ mm}$ para factor de cobertura igual a 3.

Problema 06: Tolerancias entre eje y agujero

Se quiere montar un rodamiento en un árbol. El diámetro nominal es de 20 mm. La tolerancia de apriete va desde $9 \mu\text{m}$ hasta $31 \mu\text{m}$. Las calidades permitidas son IT5, IT6 e IT7. Determine las tolerancias utilizando el método del agujero único.

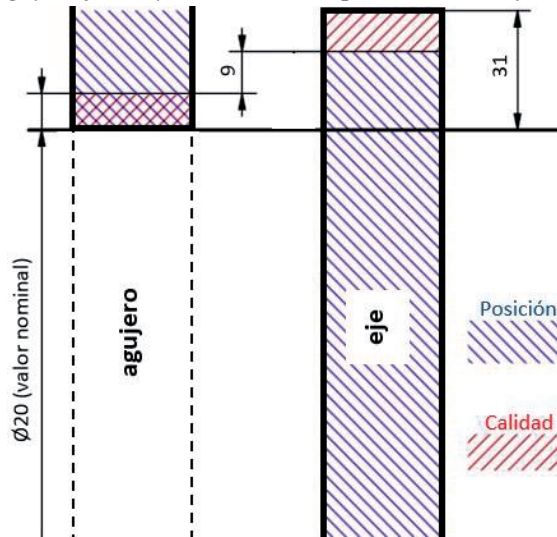
Puedes utilizar las tablas de posiciones y calidades en el Anexo VI (páginas 114-119).

Solución.

El diámetro nominal es de 20 mm. Los demás valores son desconocidos.

$$\varnothing 20 \text{ } ^{?}_{?} \text{ } ^{?}_{?}$$

El esquema del agujero y del eje indicando el aprieto mín. (9 μm) y máx. (31 μm).



La posición del agujero único es “H”.

$$\varnothing 20 H^{?}_{?} \text{ } ^{?}_{?}$$

El límite inferior de la calidad del agujero único es 0 para el diámetro de 20 mm, según la Tabla 08.

Posición	Desviación inferior										
	A	B	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H
Calidad	Todas las calidades										
$d \leq 3$	270	140	60	34	20	14	10	6	4	2	0
$3 < d \leq 6$	270	140	70	46	30	20	14	10	6	4	0
$6 < d \leq 10$	280	150	80	56	40	25	18	13	8	5	0
$10 < d \leq 14$	290	150	95		50	32		16		6	0
$14 < d \leq 18$											
$18 < d \leq 24$	300	160	110		65	40		20		7	0
$24 < d \leq 30$											
$30 < d \leq 40$	310	170	120		80	50		25		9	0
$40 < d \leq 50$	320	180	130								

$$\varnothing 20 H_0^? \quad ?_7^?$$

El apriete máximo es 31 μm . Se cuenta la distancia entre el límite inferior de la calidad de agujero hasta el límite superior de la calidad del eje.

$$\varnothing 20 H_0^? \quad ?_7^{+31}$$

Agujero y eje tienen una de las 3 calidades permitidas IT5, IT6 o IT7.

$$\varnothing 20 H_{5,6,7}_0^? \quad ?_{5,6,7}^?$$

Las calidades IT5, IT6 y IT7 para el diámetro de 20 mm, según la Tabla 07, son:

IT5 = 9 μm .

IT6 = 13 μm .

IT7 = 21 μm .

Grado Tolerancia Diámetro (mm)	Calidades (μm)							
	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11
$d \leq 3$	3	4	6	10	14	25	40	60
$3 < d \leq 6$	4	5	8	12	18	30	48	75
$6 < d \leq 10$	4	6	9	15	22	36	58	90
$10 < d \leq 18$	5	8	11	18	27	43	70	110
$18 < d \leq 30$	6	9	13	21	33	52	84	130
$30 < d \leq 50$	7	11	16	25	39	62	100	160
$50 < d \leq 80$	8	13	19	30	46	74	120	190
$80 < d \leq 120$	10	15	22	35	54	87	140	220

El límite superior de la calidad del agujero (a partir del límite inferior del agujero) es:

$$0[\mu m] + IT5 = 0[\mu m] + 9[\mu m] = +9 \mu m$$

$$0[\mu m] + IT6 = 0[\mu m] + 13[\mu m] = +13 \mu m$$

$$0[\mu m] + IT7 = 0[\mu m] + 21[\mu m] = +21 \mu m$$

Los posibles límites superiores de la calidad del agujero son 9, 13 o 21 μm .

El límite inferior de la calidad del eje (a partir del límite inf. del agujero) es:

$$0[\mu m] + IT5 + 9[\mu m] = 0[\mu m] + 9[\mu m] + 9[\mu m] = +18 \mu m$$

$$0[\mu m] + IT6 + 9[\mu m] = 0[\mu m] + 13[\mu m] + 9[\mu m] = +22 \mu m$$

$$0[\mu m] + IT7 + 9[\mu m] = 0[\mu m] + 21[\mu m] + 9[\mu m] = +30 \mu m$$

El límite inferior de la calidad del eje (a partir del límite sup. del eje) es:

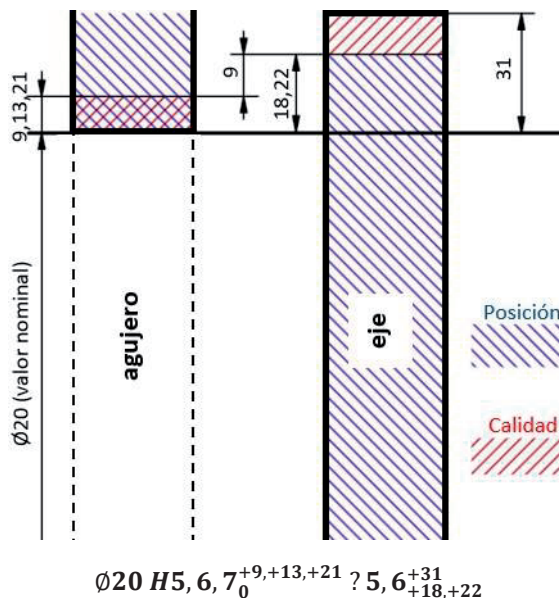
$$+31[\mu m] - IT5 = +31[\mu m] - 9[\mu m] = +22 \mu m$$

$$+31[\mu m] - IT6 = +31[\mu m] - 13[\mu m] = +18 \mu m$$

$$+31[\mu m] - IT7 = +31[\mu m] - 21[\mu m] = +10 \mu m$$

Los posibles límites inferiores de la calidad del eje son 18 o 22 μm .

Las posibles calidades del eje son $IT5(31 - 22 = 9 \mu m)$ o $IT6(31 - 18 = 13 \mu m)$.



$$\varnothing 20 H5, 6, 7_0^{+9, +13, +21} ? 5, 6_{+18, +22}^{+31}$$

La posición del eje (para el diámetro de 20 mm) es “p” y el límite inferior de la calidad del eje es 22 μm , según la Tabla 11. La calidad se quedará en IT5.

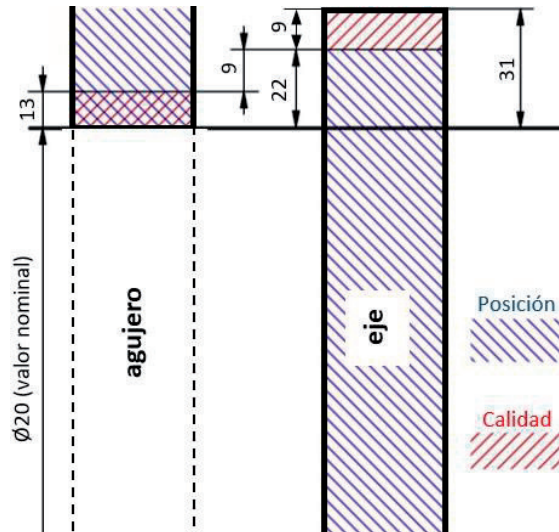
Posición	Desviación inferior									
	m	n	p	r	s	t	u	v	x	
Calidad	Todas las calidades									
$d \leq 3$	2	4	6	10	14		18		20	
$3 < d \leq 6$	4	8	12	15	19		23		28	
$6 < d \leq 10$	6	10	15	19	23		28		34	
$10 < d \leq 14$	7	12	18	23	28		33		39	45
$14 < d \leq 18$										
$18 < d \leq 24$										
$24 < d \leq 30$	8	15	22	28	35	41	48	55	64	
$30 < d \leq 40$	9	17	26	34	43	48	60	68	80	
$40 < d \leq 50$						54	70	81	97	

$$\varnothing 20 H5, 6, 7_0^{+9, +13, +21} p5_{+22}^{+31}$$

El límite superior de la calidad del agujero (a partir del límite inf. del eje) es:
 $22[\mu\text{m}] - 9[\mu\text{m}] = +13 \mu\text{m} = IT6$

$$\varnothing 20 H6_0^{+13} p5_{+22}^{+31}$$

El esquema se aprecia en la figura abajo.



En este ajuste, el agujero tiene valor $\varnothing 20 \text{ H}6$ y el eje $\varnothing 20 \text{ p}5$.

El resultado es $\varnothing 20 \text{ H}6/\text{p}5$.

Problema 07: Cálculo del intervalo de tolerancia (IT) o de calidad

Determine los intervalos de tolerancias que corresponden a las calidades 5, 6, 7 y 8 para un diámetro nominal de 39 mm que pertenece a grupo de diámetros de 30 a 50 mm. Compara los resultados con los valores en la Tabla 07.

Datos:

Calidad	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11
Tolerancia	7 <i>i</i>	10 <i>i</i>	16 <i>i</i>	25 <i>i</i>	40 <i>i</i>	64 <i>i</i>	100 <i>i</i>

Calidad	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16	IT 17	IT 18
Tolerancia	160 <i>i</i>	250 <i>i</i>	400 <i>i</i>	640 <i>i</i>	1000 <i>i</i>	1600 <i>i</i>	2500 <i>i</i>

Solución.

Se calcula la media geométrica, d , del grupo 30-50 mm:

$$d = \sqrt{d_{\min} \cdot d_{\max}} = \sqrt{30 \cdot 50} = 38.73 \text{ mm}$$

Se calcula la unidad de precisión del grupo de diámetros, i :

$$i = 0.45 \sqrt[3]{d} + 0.001d = 0.45 \sqrt[3]{38.73} + 0.001 \cdot 38.73 = 1.56$$

Finalmente se determina la tolerancia para cada calidad:

$$IT 5 = 7 \cdot i = 7 \cdot 1.56 = 10.92 \mu\text{m} \approx 11 \mu\text{m}$$

$$IT 6 = 10 \cdot i = 10 \cdot 1.56 = 15.6 \mu\text{m} \approx 16 \mu\text{m}$$

$$IT 7 = 16 \cdot i = 16 \cdot 1.56 = 24.96 \mu\text{m} \approx 25 \mu\text{m}$$

$$IT 8 = 25 \cdot i = 25 \cdot 1.56 = 39 \mu\text{m}$$

Comparando las tolerancias calculadas con las de la Tabla 07:

Calidad	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8
$30 < d \leq 50$	11 μm	16 μm	25 μm	39 μm

2. MOLDEO

El moldeo es un proceso de fabricación donde se deja solidificar metal líquido en un molde. El procedimiento más conocido es el moldeo en arena, sin embargo, existen otros tipos del moldeo como moldeo en cáscara, moldeo a la cera, moldeo al vacío, moldeo con poliestireno, moldeo por gravedad, moldeo en hueco, moldeo a presión, moldeo centrífugo, etc.

Este capítulo se va a centrar en:

- La solidificación
- El moldeo en arena y
- La fundición centrífuga.

2.1. Solidificación

Problema 08: Energía de temperatura de colado 1

Hay que fundir 2 m³ de un material metálico hipotético a partir de la temperatura ambiente, 25 °C, hasta 100 °C por encima de su temperatura de fusión. Calcule la energía necesaria para que el material metálico esté listo para empezar el proceso de moldeo.

Datos: $T_f = 1\,200\text{ °C}$, $\rho = 8.2\text{ g/cm}^3$, $C_s = 365\text{ J/kg}\cdot\text{°C}$, $C_l = 328\text{ J/kg}\cdot\text{°C}$, $H_f = 185\text{ J/g}$.

Solución.

$\rho = 8.2\text{ g/cm}^3 = 8\,200\text{ kg/m}^3 = \text{densidad}$.

$V = 2\text{ m}^3 = \text{volumen}$.

$T_0 = 25\text{ °C} = \text{temperatura inicial}$.

$T_f = 1\,200\text{ °C} = \text{temperatura de fusión}$.

$T_c = 1\,200\text{ °C} + 100\text{ °C} = 1\,300\text{ °C} = \text{temperatura de colado}$.

$C_s = 365\text{ J/kg}\cdot\text{°C} = \text{calor específico del metal sólido (J/kg}\cdot\text{°C)}$.

$C_l = 328\text{ J/kg}\cdot\text{°C} = \text{calor específico del metal líquido (J/kg}\cdot\text{°C)}$.

$H_f = 185\text{ J/g} = 185\,000\text{ J/kg} = \text{calor latente de fusión}$.

Para determinar el calor total, H , es necesario conocer previamente: H_{0-f} , H_f y H_{f-c} , donde:

- H_{0-f} es el calor necesario para subir la temperatura del material desde la T ambiente hasta la T de fusión.

- H_f es el calor necesario para convertir sólido a líquido.

- H_{f-c} es el calor necesario para subir la temperatura del material desde la T de fusión hasta la T de colado.

$$H = \rho V (H_{0-f} + H_f + H_{f-c}) = \rho V [C_s(T_f - T_0) + H_f + C_l(T_c - T_f)]$$

1) calor para elevar la temperatura de sólido hasta la temperatura de fusión:

$$H_{0-f} = C_s(T_f - T_0) = 365 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{°C}} \right] \cdot (1\,200[\text{°C}] - 25[\text{°C}]) = 428\,875 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

2) calor para convertir sólido a líquido (calor latente de fusión):

$$H_f = 185\,000 \frac{J}{kg}$$

3) calor para elevar la temperatura del metal fundido a la temperatura de colado:

$$H_{f-c} = C_l(T_c - T_f) = 328 \left[\frac{J}{kg^{\circ}C} \right] \cdot (1\,300[^{\circ}C] - 1\,200[^{\circ}C]) = 32\,800 \frac{J}{kg}$$

Finalmente, el calor total es:

$$H = \rho V [C_s(T_f - T_0) + H_f + C_l(T_c - T_f)] = \rho V (H_{0-f} + H_f + H_{f-c})$$

$$H = 8\,200 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 2[m^3] \cdot (428\,875 + 185\,000 + 32\,800) \left[\frac{J}{kg} \right] = 10.61 \cdot 10^9 J$$

La energía necesaria para que el material metálico esté listo para empezar el proceso de moldeo es $10.61 \cdot 10^9 J$.

Problema 09: Energía de temperatura de colado 2

En un proceso de moldeo se realiza el vertido de aluminio en un molde abierto de 50 cm de diámetro y 7 cm de altura. Determine la cantidad de calor necesario para llevar el aluminio hasta los 800 °C sabiendo que se produce una contracción del 6% del volumen desde la temperatura de colado hasta la temperatura ambiente.

Datos: $T_f = 660\,^{\circ}C$, $T_0 = 25\,^{\circ}C$, $H_f = 389.3\,J/g$, $C_s = C_l = 0.21\,cal/g^{\circ}C$, $\rho =$ de $2.70\,g/cm^3$.

Solución.

$D = 50\,cm$ = diámetro de la cavidad del molde.

$h = 7\,cm$ = altura de la cavidad del molde.

$T_0 = 25\,^{\circ}C$ = temperatura ambiente.

$T_f = 660\,^{\circ}C$ = temperatura de fusión del aluminio.

$T_c = 800\,^{\circ}C$ = temperatura final del aluminio.

$H_f = 389.3\,J/g$ = calor de fusión del aluminio.

$C_s = C_l = 0.21\,cal/g^{\circ}C$, $1\,cal = 4.187\,J \rightarrow 0.88\,J/g^{\circ}C$ = calor específico del Al en estado sólido y líquido.

$\rho = 2.70\,g/cm^3$ = densidad del aluminio.

Para hallar el calor necesario usaremos la ecuación:

$$H = \rho \cdot V [C_s (T_f - T_o) + H_f + C_l (T_c - T_f)]$$

Para calcular el calor antes calcularemos el volumen de aluminio que se usará:

- Volumen del molde y de aluminio a temperatura de colado:

$$V_o = \pi \frac{D^2}{4} \cdot h = \pi \frac{50[cm]^2}{4} \cdot 7[cm] = 13\,744.5\,cm^3$$

- Volumen de aluminio a temperatura ambiente:

$$V = V_o \cdot 0.94 = 13\,744.5[cm^3] \cdot 0.94 = 12\,919.8\,cm^3$$

Finalmente calculamos el calor necesario a partir del volumen obtenido:

$$H = \rho \cdot V [C_s (T_f - T_o) + H_f + C_l (T_c - T_f)]$$

$$H = 2.70 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot 12\,919.8[cm^3] \cdot$$

$$\cdot \left[0.88 \left[\frac{J}{g \cdot ^\circ C} \right] \cdot (660 - 25)[^\circ C] + 389.3 \left[\frac{J}{g} \right] + 0.88 \left[\frac{J}{g \cdot ^\circ C} \right] (800 - 660)[^\circ C] \right] =$$

$$= 37\,370\,650.7\,J = 37.4\,MJ$$

Problema 10: Características del bebedero

El caudal necesario para el bebedero de un molde es de 1.5 litros/s. La sección transversal del bebedero en la parte superior tiene un área de 1 000 mm². La longitud del bebedero es 200 mm de longitud. ¿Qué área es necesaria en la base del bebedero para evitar que se aspire el fluido?

Solución.

Para resolver el problema hay que usar la ecuación de Bernoulli:

$$h_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F_2$$

h = altura, m.

P = presión en el líquido, Pa.

ρ = densidad, kg/m³.

g = aceleración de la gravedad, 9.81 m/s².

v = velocidad de flujo, m/s.

F = pérdida de carga por fricción, m.

Los subíndices 1 y 2 son dos puntos cualesquiera del fluido.

Tomando el punto 1 en la parte superior del bebedero y el punto 2 en la parte inferior del mismo, la ecuación de Bernoulli se simplifica quedando de la siguiente forma:

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g} \rightarrow v_2 = \sqrt{2gh_1}$$

Por otra parte, la ecuación de ley de continuidad viene dada por la siguiente expresión:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$Q = 1.5 \text{ l/s} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ = caudal.

v = velocidad, m/s.

$A_1 = 1\,000 \text{ mm}^2$ = sección transversal del bebedero en la parte superior.

$h_1 = 200 \text{ mm} = 0.2 \text{ m}$ = longitud del bebedero.

Los subíndices 1 y 2 son dos puntos cualesquiera del fluido.

Tomando las ecuaciones anteriores y sustituyendo los valores, se obtienen los siguientes resultados:

$$v_2 = \sqrt{2gh_1} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 0.2[\text{m}]} = 1.9809 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1\,980.9 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$Q = A_2 v_2 \rightarrow A_2 = \frac{Q}{v_2} = \frac{1.5 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \right]}{1\,980.9 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]} = 757.23 \text{ mm}^2$$

Finalmente, para evitar la aspiración del fluido el bebedero de cumplir que:

- el bebedero sea de forma cónica.
- la velocidad del fluido en el punto 1 debe ser menor que en el punto 2.
- el caudal sea igual en los puntos 1 y 2.
- el área en el punto 1 tiene que ser mayor que en punto 2.

Problema 11: Caudal, velocidad y tiempo de colado

En el diseño de un molde de arena para fabricar piezas de aluminio se observa que el volumen de la cavidad es 2.83 dm^3 y la altura del bebedero es 25 cm. La longitud y el área del vaciadero horizontal es 10 cm y 3 cm^2 , respectivamente. La base del bebedero tiene la misma área como el vaciadero.

Determine:

- ¿Qué caudal y velocidad se pueden esperar en el final del bebedero?
- ¿Cuánto tiempo tardará en llenarse la cavidad del molde?

Solución.

$h_1 = 25 \text{ cm} = 0.25 \text{ m} = \text{altura.}$

$A = 3 \text{ cm}^2 = 0.0003 \text{ m}^2 = \text{área de la parte inferior del bebedero.}$

$V = 2.83 \text{ dm}^3 = 0.00283 \text{ m}^3 = \text{volumen de la cavidad.}$

$g = 9.81 \text{ m/s}^2 = \text{aceleración de la gravedad.}$

- Primero hay que determinar la velocidad, v , que alcanzará el metal líquido en la parte inferior del bebedero.

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g} \Rightarrow v_2 = \sqrt{2gh_1} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 0.25[\text{m}]} = 2.215 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La velocidad en el final del bebedero es 2.215 m/s.

El **caudal**, Q , sigue la siguiente fórmula:

$$Q = A_2 v_2 = 0.0003[\text{m}^2] \cdot 2.215 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = 0.6645 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El caudal en el final del bebedero es $0.6645 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

- El tiempo para llenar la cavidad del molde depende del volumen de la cavidad y del caudal.

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{0.00283[\text{m}^3]}{0.6645 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]} = 4.26 \text{ s}$$

El **tiempo** mínimo, t , (se ignoran pérdidas por fricción y la posible obstrucción del flujo en el sistema de paso) para llenar la cavidad del molde es 4.26 s.

Problema 12: Características teóricas y reales del colado

Se desea hacer una pieza en un molde de arena donde el vertido se hace con caudal constante, despreciando el material que queda en el embudo. El área de la sección transversal en la parte superior del bebedero es de 2.4 cm^2 y de la base es de 2.1 cm^2 , siendo la longitud del bebedero de 38 cm . Por otra parte, el vaciadero que lleva al bebedero tiene la misma área que la base del bebedero y tiene 21 cm de largo antes de la cavidad que tiene un volumen de $1\,000 \text{ cm}^3$. Para realizar la operación de forma correcta, hay una mazarota que esta a lo largo del vaciadero con un volumen de 400 cm^3 . Para llenar todos los elementos (cavidad, mazarota, vaciadero y bebedero) se tarda un total de 3 segundos, siendo este tiempo mayor del que en teoría se requiere ya que hay pérdidas por fricción en el bebedero y el vaciadero.

Calcular:

- La velocidad y caudal teóricos en la base del bebedero.
- El volumen total del molde.
- El tiempo teórico para llenar la cavidad y el molde (cavidad, mazarota, vaciadero y bebedero).
- El caudal y la velocidad reales en la base del bebedero, teniendo en cuenta la fricción.
- La altura del bebedero y la pérdida de altura en el sistema debido a la fricción.

Solución.

$A_1 = 2.4 \text{ cm}^2 =$ área de la parte superior del bebedero.

$A_2 = 2.1 \text{ cm}^2 =$ área de la parte inferior del bebedero.

$h_1 = 38 \text{ cm} = 0.38 \text{ m} =$ altura del bebedero.

$h_{\text{vaciadero}} = 21 \text{ cm} =$ longitud del vaciadero.

$g = 9.81 \text{ m/s}^2 =$ aceleración de la gravedad.

$V_{\text{cavidad}} = 1\,000 \text{ cm}^3 =$ volumen de la cavidad.

$V_{\text{mazarota}} = 400 \text{ cm}^3 =$ volumen de la mazarota.

- Para resolver este apartado, es necesario usar la fórmula de Bernoulli simplificada:

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g} \rightarrow v_2 = \sqrt{2gh_1}$$

Tomando 1 en la parte superior del bebedero y 2 en la base de este, se tiene que la velocidad teórica es:

$$v_2 = \sqrt{2gh_1} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 0.38[\text{m}]} = 2.73 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 273 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Para calcular el caudal en la base del bebedero hay que usar la expresión:

$$Q = A_2 v_2 = 2.1[\text{cm}^2] \cdot 273 \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right] = 573.3 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

- b) Para obtener el volumen total del molde hay que sumar el volumen de la cavidad, el de la mazarota, el del bebedero y el del vaciadero, esto queda:

$$V_{\text{total}} = V_{\text{cavidad}} + V_{\text{mazarota}} + V_{\text{bebedero}} + V_{\text{vaciadero}}$$

$$V_{\text{bebedero}} = \frac{A_1 + A_2}{2} \cdot h_1 = \frac{2.4 + 2.1}{2} \cdot 38 = 85.5 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{vaciadero}} = A_2 \cdot h_{\text{vaciadero}} = 2.1 \cdot 21 = 44.1 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{total}} = 1000 + 400 + \left(\frac{2.4 + 2.1}{2} \cdot 38 \right) + (2.1 \cdot 21) = 1529.6 \text{ cm}^3$$

- c) El tiempo de llenado depende del volumen por rellenar y del caudal del flujo.

$$t_{\text{cavidad}} = \frac{V_{\text{cavidad}}}{Q} = \frac{0.001[\text{m}^3]}{0.5733 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]} = 1.7 \text{ s}$$

$$t_{\text{molde}} = \frac{V_{\text{total}}}{Q} = \frac{0.0015296[\text{m}^3]}{0.5733 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]} = 2.7 \text{ s}$$

- d) El caudal y la velocidad reales en la base del bebedero se calcula de la siguiente forma:

$$Q' = \frac{V_{\text{total}}}{t} = \frac{1529.6 [\text{cm}^3]}{3[\text{s}]} = 510.0 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

$$v_2' = \frac{Q'}{A_2} = \frac{510.0 \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \right]}{2.1[\text{cm}^2]} = 242.8 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

- e) La altura real, contando con el efecto de la fricción, se calcula con la ecuación de Bernoulli simplificada citada en el apartado a):

$$h_1' = \frac{(v_2')^2}{2g} = \frac{242.8^2 \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]^2}{2 \cdot 981 \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \right]} = 30 \text{ cm}$$

Finalmente, la pérdida de altura H es:

$$H = h - h_1' = 38 - 30 = 8 \text{ cm}$$

Problema 13: Contracción

En un molde, el espacio interior para moldear las piezas es de forma cúbica con 150 mm de lado. Calcule las dimensiones finales y volumen de una pieza de cobre moldeada una vez esté a temperatura ambiente.

Datos:

La contracción lineal de fase líquida (L) es del 0.5%.

La contracción lineal durante la solidificación (L→S) es del 4.5%.

La contracción lineal de fase sólida (S) es del 7.5%.

El molde está lleno al inicio de la solidificación, y la contracción es igual en todas las direcciones.

Solución.

Para resolver el problema hay que tener en cuenta las 3 contracciones que se producen a lo largo de la solidificación:

1) Contracción inicial en la fase líquida:

$$C_L = 150[\text{mm}] \cdot 0.995 = 149.25 \text{ mm}$$

2) Contracción durante la solidificación:

$$C_{L-S} = 149.25[\text{mm}] \cdot 0.955 = 142.53 \text{ mm}$$

3) Contracción final en la fase sólida:

$$C_S = 142.53[\text{mm}] \cdot 0.925 = 131.84 \text{ mm}$$

La longitud final del cubo es:

$$L_{\text{pieza}} = 131.84 \text{ mm}$$

El volumen final del cubo es:

$$V_{pieza} = (L_{pieza})^3 = (131.84)^3 [mm^3] = 2\,291\,808.54\,mm^3 = \mathbf{2.29\,dm^3}$$

Problema 14: Expansión

A partir de una pieza moldeada de forma cúbica de aluminio, se desean conocer las dimensiones (la longitud y volumen) de la cavidad del molde donde se fabricó. Los lados del cubo de aluminio miden 125 mm. Suponer que la contracción fue uniforme en todas las direcciones y que el molde estaba lleno al inicio de la solidificación.

Tener en cuenta lo siguiente:

La contracción de la fase líquida (L) es del 0.5%.

La contracción durante la solidificación (L→S) es del 7.0%.

La contracción en la fase sólida (S) es del 5.6%.

Solución.

Para obtener las dimensiones de la cavidad del molde, hay que tener en cuenta las 3 contribuciones de contracción o en nuestro caso expansión que se producen a lo largo del calentamiento:

1) Expansión inicial en la fase sólida:

$$C_S = \frac{125[mm]}{0.944} = \mathbf{132.42\,mm}$$

2) Expansión durante la solidificación:

$$C_{L-S} = \frac{132.42[mm]}{0.93} = \mathbf{142.38\,mm}$$

3) Expansión final en la fase líquida:

$$C_L = \frac{142.38[mm]}{0.944} = \mathbf{143.10\,mm}$$

La longitud final de la cavidad del molde es:

$$L_{cavidad} = \mathbf{143.10\,mm}$$

El volumen final de la cavidad del molde es:

$$V_{cavidad} = (L_{cavidad})^3 = (143.10)^3 [mm^3] = 2\,930\,191.26\,mm^3 = \mathbf{2.93\,dm^3}$$

Problema 15: Escala de la regla de contracción

Se quieren fabricar una pieza por moldeo de tres metales diferentes. ¿Cuál será la escala de la regla de contracción utilizada? Aplica los valores a una longitud de 300 mm y compáralos con una regla estándar de 300 mm.

Metal	Contracción lineal
Fundición gris	1.0%
Acero al carbono	1.8%
Zinc	2.6%

Solución.

Nos facilitan el porcentaje de contracción de cada aleación, por lo tanto, aplicamos la siguiente expresión para las distintas aleaciones:

$$\text{Contracción lineal} = 1 - \% \text{contracción}$$

$$\text{Elongación} = \frac{1}{\text{Contracción lineal}}$$

$$\text{Para longitud de } 300\text{mm} = 300[\text{mm}] \cdot (\text{Elongación})$$

$$\text{Longitud sobrante} = (\text{Para longitud de } 300\text{mm}) - 300\text{mm}$$

Fundición gris:

$$\text{Contracción lineal} = 1 - 0.01 = 0.99$$

$$\text{Elongación} = \frac{1}{0.99} = 1.\overline{01}$$

$$\text{Para longitud de } 300 \text{ mm} = 300[\text{mm}] \cdot 1.\overline{01} = 303.\overline{03} \text{ mm}$$

$$\text{Longitud sobrante} = 303.\overline{03} - 300 = 3.\overline{03} \text{ mm}$$

Acero al carbono:

$$\text{Contracción lineal} = 1 - 0.018 = 0.982$$

$$\text{Elongación} = \frac{1}{0.982} = 1.01833$$

$$\text{Para longitud de } 300 \text{ mm} = 300[\text{mm}] \cdot 1.01833 = 305.499 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud sobrante} = 305.499 - 300 = 5.50 \text{ mm}$$

Zinc:

$$\text{Contracción lineal} = 1 - 0.026 = 0.974$$

$$\text{Elongación} = \frac{1}{0.974} = 1.0267$$

$$\text{Para longitud de } 300 \text{ mm} = 300[\text{mm}] \cdot 1.0267 = \mathbf{308.008 \text{ mm}}$$

$$\text{Longitud sobrante} = 308.008 - 300 = \mathbf{8.01 \text{ mm}}$$

Problema 16: Regla de Chvorinov (tiempo de solidificación)

Debido a las experiencias anteriores se sabe que la constante del molde para el acero es de 4.0 min/cm². Determine el tiempo total de solidificación para:

- a) Una esfera de 6.2 cm de radio,
- b) Un cubo de 10 cm de lado,
- c) Un disco de 7.98 cm de radio y 5 cm de altura y
- d) Un prisma de 4 · 5 · 50 cm.

El volumen para todas las piezas es de 1 000 cm³.

¿Qué forma de la pieza va a tardar más tiempo para solidificar?

Solución.

Aplicamos la regla de Chvorinov para los tres casos:

$$t_s = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

t_s = tiempo total de solidificación

$C_m = 4.0 \text{ min/cm}^2$ = constante del molde

$V = 1\,000 \text{ cm}^3$ = volumen del fundido

A = área de la superficie del fundido

- a) Esfera de 6.2 cm de radio.

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi \cdot 6.2^2 = \mathbf{483.05 \text{ cm}^2}$$

$$t_{s(f)} = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^2 = 4.0 \left[\frac{\text{min}}{\text{cm}^2} \right] \left(\frac{1\,000[\text{cm}^3]}{483.05[\text{cm}^2]} \right)^2 = \mathbf{17.14 \text{ min}}$$

b) Cubo de 10 cm de lado.

$$A = 6 \cdot 10^2 [cm^2] = \mathbf{600 \text{ cm}^2}$$

$$t_{s(f)} = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^2 = 4.0 \left[\frac{min}{cm^2} \right] \left(\frac{1\,000 [cm^3]}{600 [cm^2]} \right)^2 = \mathbf{11.1 \text{ min}}$$

c) Disco de 7.98 cm de radio y 5 cm de altura.

$$A = 2 \cdot base + cilindro = 2(\pi \cdot 7.98^2 [cm^2]) + 2\pi \cdot 7.98 [cm] \cdot 5 [cm] \\ = 400.12 + 250.70 = \mathbf{650.82 \text{ cm}^2}$$

$$t_{s(f)} = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^2 = 4.0 \left[\frac{min}{cm^2} \right] \left(\frac{1\,000 [cm^3]}{650.82 [cm^2]} \right)^2 = \mathbf{9.44 \text{ min}}$$

d) Prisma de 4-5-50 cm.

$$A = 2 \cdot (4 \cdot 5) [cm^2] + 2 \cdot (5 \cdot 50) [cm^2] + 2 \cdot (4 \cdot 50) [cm^2] = \mathbf{940 \text{ cm}^2}$$

$$t_{s(f)} = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^2 = 4.0 \left[\frac{min}{cm^2} \right] \left(\frac{1\,000 [cm^3]}{940 [cm^2]} \right)^2 = \mathbf{4.53 \text{ min}}$$

Mayor tiempo de solidificación tendrá siempre una esfera, ya que, tiene la menor área superficial para un volumen constante.

Problema 17: Regla de Chvorinov (máximo tiempo de solidificación)

- Para un proceso de moldeo en arena determine, cual es la razón de diámetro y longitud de una mazarota cilíndrica para que el tiempo de solidificación del fundido sea máximo. Suponga que el volumen es constante.
- Determine la longitud de una mazarota con diámetro 12 cm para que el tiempo de solidificación del fundido sea máximo.

Solución.

t_s = tiempo total de solidificación.

C_m = constante del molde.

V = volumen del fundido.

A = área de la superficie del fundido.

D = diámetro de la mazarota cilíndrica.

L = longitud de la mazarota cilíndrica.

a) Según la ley de Chvorinov,

$$t_s = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

para que t_s se maximice, V/A también deben maximizarse.

Volumen del cilindro.

$$V = L \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow L = \frac{4V}{\pi D^2}$$

Área del cilindro.

$$A = 2 \frac{\pi D^2}{4} + \pi D L$$

Sustituimos la expresión de L en la ecuación del área:

$$A = 2 \frac{\pi D^2}{4} + \pi D L = \frac{\pi D^2}{2} + \pi D \left(\frac{4V}{\pi D^2} \right) = \frac{\pi D^2}{2} + \frac{4V}{D}$$

Derivamos la expresión del área con respecto del diámetro para maximizar la ecuación:

$$\frac{dA}{dD} = \pi D - \frac{4V}{D^2} = 0$$

Si ordenamos obtenemos que:

$$\pi D = \frac{4V}{D^2} \rightarrow V = \frac{\pi D^3}{4}$$

De la expresión anterior de L , sustituimos con la ecuación de D .

$$L = \frac{4V}{\pi D^2} = \frac{4 \frac{\pi D^3}{4}}{\pi D^2} \rightarrow L = D$$

Obtenemos así que la expresión de D y L son iguales por lo tanto la razón de D/L óptimo es 1.

b) Para un diámetro de mazarota de 12 cm su longitud maximizada también sería 12 cm.

Problema 18: Regla de Chvorinov (dimensiones del vertedor)

Para un molde de fundición en arena se desea obtener una pieza de acero de dimensiones $12 \text{ cm} \cdot 6.5 \text{ cm} \cdot 2.5 \text{ cm}$. Debe diseñarse una mazarota cilíndrica tal que el tiempo total de solidificación pase de 1.4 min a 2.0 min. Calcule las dimensiones del vertedor a partir de la ley de Chvorinov si la relación diámetro-altura de este es igual a 1.

Solución.

D = diámetro de la mazarota cilíndrica.

H = altura de la mazarota cilíndrica.

$T_{Ts0} = 1.4 \text{ min}$ = tiempo total de solidificación sin mazarota.

$T_{Ts} = 2 \text{ min}$ = tiempo total de solidificación con mazarota.

$L \cdot w \cdot t = 12 \text{ cm} \cdot 6.5 \text{ cm} \cdot 2.5 \text{ cm}$ = longitud · ancho · espesor.

C_m = constante del molde.

Resolveremos el problema usando la ley de Chvorinov:

$$t_s = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

Calculamos el volumen y el área total del molde:

$$V = L \cdot w \cdot t = 12[cm] \cdot 6.5[cm] \cdot 2.5[cm] = 195 \text{ cm}^3$$

$$\begin{aligned} A &= 2((L \cdot w) + (w \cdot t) + (L \cdot t)) \\ &= 2(12[cm] \cdot 6.5[cm] + 6.5[cm] \cdot 2.5[cm] + 12.5[cm] \cdot 2.5[cm]) \\ &= 248.5 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Ahora sustituimos los valores y calculamos C_m :

$$C_m = \frac{T_{s(f)}}{\left(\frac{V}{A} \right)^2} = \frac{1.4[min]}{\left(\frac{195[cm^3]}{248.5[cm^2]} \right)^2} = 2.27 \frac{min}{cm^2}$$

Calculamos el volumen y el área de la mazarota cilíndrica, y sustituimos H por D ya que son iguales por la relación dada, $D/H=1$:

$$V = \frac{D^2}{4} \cdot \pi \cdot H = \frac{D^3}{4} \cdot \pi$$

$$A = (\pi D \cdot H) + \left(\pi \frac{D^2}{4} \cdot 2 \right) = \frac{3\pi D^2}{2}$$

$$\frac{V}{A} = \frac{D}{6}$$

Sustituimos en la ley de Chvorinov y despejamos D:

$$T_{s(f)} = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^2 = 2[\text{min}] = 2.27 \left[\frac{\text{min}}{\text{cm}^2} \right] \times \left(\frac{D}{6} \right)^2$$

$$D = \sqrt{\frac{2[\text{min}]}{2.27 \left[\frac{\text{min}}{\text{cm}^2} \right]}} \times 6 = 5.63 \text{ cm}$$

Las dimensiones de la mazarota cilíndrica serán:

$$D = 5.63 \text{ cm y } H = 5.63 \text{ cm}$$

Problema 19: Regla de Chvorinov (fundidos de diferentes tamaños)

Una pieza de acero con densidad de 7.85 g/cm^3 y fabricada por moldeo en arena pesa unos 9 kg. Su forma es un cilindro con 10 cm de diámetro. El proceso de la solidificación dura unos 6 minutos. Otra pieza cilíndrica del acero pesa 5.5 kg y mantiene la razón diámetro/longitud igual que la pieza anterior. Determine:

- La constante del molde.
- Las dimensiones de la pieza más pequeña.
- El tiempo de la solidificación de la pieza más pequeña.

Solución.

$\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$ = densidad del acero.

C_m = constante del molde.

$t_s = 6 \text{ min}$ = tiempo total de solidificación.

V = volumen del fundido.

A = área de la superficie del fundido.

$D = 10 \text{ cm}$ = diámetro del fundido.

L = longitud del fundido.

$m = 9 \text{ kg} = 9\,000 \text{ g}$ = peso del fundido.

$m_2 = 5.5 \text{ kg}$ = peso del fundido más ligero.

$V_2, A_2, D_2, L_2, t_{s2}$ = valores para fundido más ligero.

a) Calculamos primero el volumen del acero.

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} = \frac{9\,000[g]}{7.85 \left[\frac{g}{cm^3} \right]} = \mathbf{1\,146.50\,cm^3}$$

Ahora calculamos la longitud.

$$V = L \cdot \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow L = V \cdot \frac{4}{\pi D^2} = 1\,146.50[cm^3] \cdot \frac{4}{\pi \cdot 10^2[cm]^2} = \mathbf{14.60\,cm}$$

Obtenemos el área.

$$A = 2 \frac{\pi D^2}{4} + \pi DL = 2 \frac{\pi \cdot 10^2[cm]^2}{4} + \pi \cdot 10[cm] \cdot 14.60[cm] = \mathbf{615.75\,cm^2}$$

A partir de la fórmula de Chvorinov

$$t_s = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^2 \rightarrow C_m = \frac{t_s}{\left(\frac{V}{A} \right)^2} = \frac{6[min]}{\left(\frac{1\,146.50[cm^3]}{615.75[cm^2]} \right)^2} = \mathbf{1.73 \frac{min}{cm^2}}$$

b) Buscamos las dimensiones para fundido más pequeño:

El peso es proporcional al volumen:

$$V_2 = \frac{m_2}{m} \cdot V = \frac{5.5[kg]}{9[kg]} \cdot 1\,146.50[cm^3] = \mathbf{700.64\,cm^3}$$

La relación entre diámetro y longitud del fundido más pequeño.

$$\frac{D}{L} = \frac{D_2}{L_2} = \frac{10[cm]}{14.60[cm]} = 0.685 \rightarrow L_2 = \frac{D_2}{0.685}$$

Obtenemos así el diámetro.

$$V_2 = L_2 \cdot \frac{\pi D_2^2}{4} = \left(\frac{D_2}{0.685} \right) \cdot \frac{\pi D_2^2}{4} = 0.365 \cdot \pi D_2^3 \rightarrow$$

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{V_2}{0.365 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{700.64[cm^3]}{1.147}} = \mathbf{8.485\,cm}$$

Finalmente, la longitud es:

$$L_2 = \frac{D_2}{0.685} = \frac{8.485[cm]}{0.685} = 12.388 \text{ cm}$$

- c) Buscamos el tiempo de solidificación total del fundido más pequeño a partir de la fórmula de Chvorinov.

$$V_2 = \pi \frac{D_2^2}{4} \cdot L_2 = \pi \frac{8.485^2[cm]^2}{4} \cdot 12.388[cm] = 700.48 \text{ cm}^3$$

$$A_2 = 2 \frac{\pi D_2^2}{4} + \pi D_2 L_2 = 2 \frac{\pi \cdot 8.485^2[cm]^2}{4} + \pi \cdot 8.485[cm] \cdot 12.388[cm] \\ = 443.31 \text{ cm}^2$$

$$t_{s2} = C_m \left(\frac{V_2}{A_2} \right)^2 = 1.73 \left[\frac{min}{cm^2} \right] \left(\frac{700.48 [cm^3]}{443.31 [cm^2]} \right)^2 = 4.3 \text{ min}$$

Problema 20: Regla de Chvorinov (diseño de la mazarota 1)

El fundido, en proceso de moldeo en arena, es una placa rectangular con longitud de 15 cm, ancho 8 cm y espesor 1.5 cm. El tiempo total de solidificación del fundido es de 4.8 min. ¿Cuál es el diámetro de la mazarota esférica si tiene que solidificar 17% de tiempo más tarde que el fundido?

Solución.

$L, w, t = 15 \text{ cm}, 8 \text{ cm}, 1.5 \text{ cm}$ = longitud, ancho, espesor del fundido.

$t_s = 4.8 \text{ min}$ = tiempo total de solidificación.

C_m = constante del molde.

V, A, D = volumen, área de la superficie, diámetro del fundido.

Calculo de volumen y área del fundido.

$$V = L \cdot w \cdot t = 15 \cdot 8 \cdot 1.5 = 180 \text{ mm}^3$$

$$A = 2(L \cdot w + w \cdot t + L \cdot t) = 2(15 \cdot 8 + 8 \cdot 1.5 + 15 \cdot 1.5) = 309 \text{ mm}^2$$

Ahora se determina la constante del molde.

$$t_s = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^2 \rightarrow C_m = \frac{t_s}{\left(\frac{V}{A} \right)^2} = \frac{4.8[min]}{\left(\frac{180[cm^3]}{309[cm^2]} \right)^2} = 14.145 \frac{min}{cm^2}$$

Tiempo de solidificación de mazarota esférica.

$$t_s = 1.17[+17\%] \cdot 4.8[\text{min}] = 5.616 \text{ min}$$

V/A de mazarota esférica.

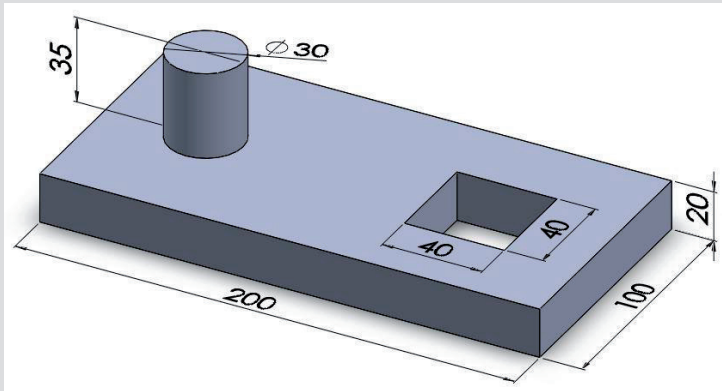
$$\frac{V}{A} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{4\pi r^2} = \frac{r}{3} = \frac{D}{6}$$

diámetro de la mazarota esférica.

$$t_s = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^2 = C_m \left(\frac{D}{6}\right)^2 \rightarrow D = 6 \cdot \sqrt{\frac{t_s}{C_m}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{5.616[\text{min}]}{14.145 \left[\frac{\text{min}}{\text{cm}^2}\right]}} = 3.78 \text{ cm}$$

Problema 21: Regla de Chvorinov (diseño de la mazarota 2)

En un moldeo en arena el fundido tiene tamaño y forma según la figura abajo (unidades en mm). Todos los valores están en milímetros. La constante del molde es de 2.17 min/cm² en la regla de Chvorinov. ¿Cuáles son las dimensiones de la mazarota para que solidifique 0.5 min más tarde que el fundido? La razón diámetro a longitud de la mazarota tiene que ser 1.0.



Solución.

Resolveremos el problema usando la ley de Chvorinov:

$$t_s = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^2$$

Calculamos el volumen total de la pieza:

$$\begin{aligned}
 V_{fundido} &= V_{base} + V_{cilindro} - V_{hueco} \\
 V_{base} &= (20[cm] \cdot 10[cm] \cdot 2[cm]) = \mathbf{400\ cm^3} \\
 V_{cilindro} &= \pi \frac{D^2}{4} \cdot h = \left(\pi \cdot \frac{3^2[cm]^2}{4} \times 3[cm] \right) = \mathbf{21.21\ cm^3} \\
 V_{hueco} &= 4[cm] \cdot 4[cm] \cdot 2[cm] = \mathbf{32\ cm^3} \\
 V_{fundido} &= 400 + 21.21 - 32 = \mathbf{389.21\ cm^3}
 \end{aligned}$$

Calculamos el área total de la pieza:

$$\begin{aligned}
 A_{fundido} &= 2(10 \cdot 2) + 2(20 \cdot 2) + 4(4 \cdot 2) + [2(20 \cdot 10 - 4 \cdot 4)] + (\pi \cdot 3 \cdot 3) \\
 &= \mathbf{548.27\ cm^2}
 \end{aligned}$$

Regla de Chvorinov:

$$t_s = C_m \cdot \left(\frac{V_{fundido}}{A_{fundido}} \right)^2 = 2.17 \left[\frac{min}{cm^2} \right] \left(\frac{389.21\ [cm^3]}{548.27[cm^2]} \right)^2 = \mathbf{1.1\ min}$$

Añadimos los 0.5 min de más para solidificación:

$$t_{s(maz)} = 1.1[min] + 0.5[min] = \mathbf{1.6\ min}$$

Calculamos el volumen de la mazarota cilíndrica:

$$V_{maz} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} = \frac{\pi \cdot D^3}{4} = 0.25\pi D^3$$

Hallamos el área de la mazarota cilíndrica:

$$A_{maz} = (\pi \cdot D \cdot L) + 2 \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) = \pi D^2 + \frac{\pi D^2}{2} = 1.5\pi D^2$$

Calculamos el diámetro de la mazarota:

$$\begin{aligned}
 t_{s(maz)} &= C_m \cdot \left(\frac{V_{maz}}{A_{maz}} \right)^2 = C_m \cdot \left(\frac{0.25\pi D^3}{1.5\pi D^2} \right)^2 = C_m \cdot \left(\frac{D}{6} \right)^2 \rightarrow \\
 D &= 6 \cdot \sqrt{\frac{t_{s(maz)}}{C_m}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1.6[min]}{2.17 \left[\frac{min}{cm^2} \right]}} = \mathbf{5.15\ cm = L}
 \end{aligned}$$

2.2. Moldeo en Arena

Problema 22: Contracción y coeficiente de seguridad

El bloque motor monopistón puede simplificarse como un cubo de $200 \cdot 200 \cdot 200$ mm con un agujero pasante de 100 mm de diámetro. Calcule la cantidad en kilos de material necesario para fabricar 100 piezas por moldeo. Se deben modificar las cotas de los agujeros (10 mm) para que luego de mecanizarse, lleguen al diámetro nominal descrito. Se empleará una mazarota cilíndrica ($H=D$) calculada a partir del criterio de la contracción. Emplee una contracción volumétrica del 6%, y un coeficiente de seguridad igual a 2. La cantidad de material que se queda en los canales de alimentación es un 5% del volumen de la pieza. La pieza se fabricará en aluminio con una densidad de 2.5 g/cm^3 .

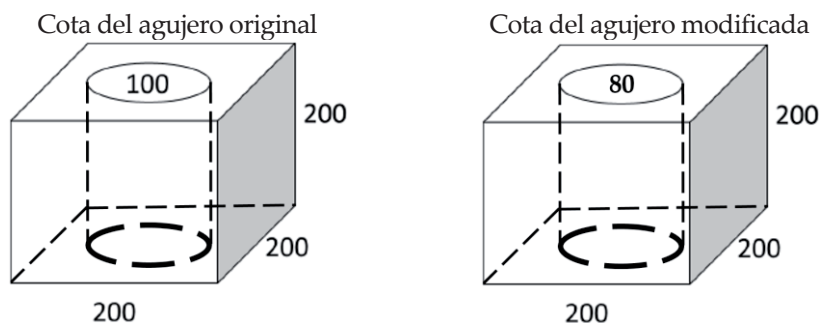
Solución.

$c = 6\% = 0.06 =$ coeficiente de contracción volumétrica del metal.

$k = 2 =$ coeficiente de seguridad.

$\rho_{Al} = 2.5 \text{ g/cm}^3 =$ densidad del aluminio.

En la figura hay un esquema de la pieza con la cota del agujero original y modificada para su posterior mecanizado.



El peso de una pieza se calcula utilizando la densidad del material y el volumen de todas las partes del molde que se tienen que rellenar con el material fundido para poder fabricar la pieza:

$$m = \rho \cdot V_{total}$$

$$V_{total} = V_{pieza} + V_{maz.min} + V_{canales}$$

Primero se calculan volúmenes de todas las partes del molde y el volumen total del molde:

$$V_{pieza} = V_{cubo} - V_{agujero} = (20 \cdot 20 \cdot 20) - \left(\pi \left(\frac{8}{2} \right)^2 \cdot 20 \right) = 6\,994 \text{ cm}^3$$

$$V_{maz.min} = V_{pieza} \cdot c \cdot k = 6\,994 [\text{cm}^3] \cdot 0.06 \cdot 2 = 839 \text{ cm}^3$$

$$V_{canales} = V_{pieza} \cdot 0.05 = 6\,994 [\text{cm}^3] \cdot 0.05 = 349 \text{ cm}^3$$

$$V_{total} = V_{pieza} + V_{maz.min} + V_{canales} = 6\,994 + 839 + 349 = 8\,182 \text{ cm}^3$$

Finalmente, se determina el peso de una pieza y peso de 100 piezas:

$$m = \rho \cdot V_{total} = 2.5 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \cdot 8\,182 [\text{cm}^3] = 20\,455 \frac{\text{g}}{\text{pieza}} = 2\,045.5 \frac{\text{kg}}{100 \text{ piezas}}$$

Problema 23: Contracción volumétrica y lineal

En un proceso de fundición de diferentes materiales se tiene un molde abierto cuadrado de 150 mm de lado y 45 mm de profundidad. Calcule las dimensiones finales del molde teniendo en cuenta las contracciones volumétricas y lineales si se utilizan 800 000 mm³ de los siguientes materiales:

- Fundición gris (1.8% de contracción volumétrica y 1.0% de contracción lineal).
- Acero al carbono (3% de contracción volumétrica y 1.8% de contracción lineal).
- Bronce (5.5% de contracción volumétrica y 1.6% de contracción lineal).

Solución.

$L = 150 \text{ mm}$ = longitud del lado de la base del molde.

$h_o = 45 \text{ mm}$ = profundidad del molde.

$V_o = 800\,000 \text{ mm}^3$ = volumen de material fundido vertido en el molde.

- a) Fundición gris: Calculamos el área de la base del molde:

$$A = L \cdot L = 150 [\text{mm}] \cdot 150 [\text{mm}] = 22\,500 \text{ mm}^2$$

Calculamos el volumen de material tras la contracción volumétrica:

$$V = V_o \cdot \frac{100 - 1.8}{100} = 800\,000 [\text{mm}^3] \cdot \frac{100 - 1.8}{100} = 785\,600 \text{ mm}^3$$

Calculamos la altura del molde:

$$h = \frac{V}{A} = \frac{785\,600[mm^3]}{22\,500[mm^2]} = \mathbf{34,92\,mm}$$

Las dimensiones del molde final tras la contracción lineal son:

$$L_f = L \cdot \frac{100 - 1}{100} = 150[mm] \cdot \frac{100 - 1}{100} = \mathbf{148,5\,mm}$$

$$h_f = h \cdot \frac{100 - 1}{100} = 34,92[mm] \cdot \frac{100 - 1}{100} = \mathbf{34,57\,mm}$$

b) Acero al carbono: El área de la base del molde será la misma que la calculada en el apartado "a":

$$A = L \cdot L = 150[mm] \cdot 150[mm] = \mathbf{22\,500\,mm^2}$$

Calculamos el volumen de material tras la contracción volumétrica:

$$V = V_o \cdot \frac{100 - 3}{100} = 800\,000[mm^3] \cdot \frac{100 - 3}{100} = \mathbf{776\,000\,mm^3}$$

Calculamos la altura del molde:

$$h = \frac{V}{A} = \frac{776\,000[mm^3]}{22\,500[mm^2]} = \mathbf{34,49\,mm}$$

Las dimensiones del molde final tras la contracción lineal son:

$$L_f = L \cdot \frac{100 - 1,8}{100} = 150[mm] \cdot \frac{100 - 1,8}{100} = \mathbf{147,3\,mm}$$

$$h_f = h \cdot \frac{100 - 1,8}{100} = 34,49[mm] \cdot \frac{100 - 1,8}{100} = \mathbf{33,87\,mm}$$

c) Bronce: El área de la base del molde será la misma que la calculada en el apartado "a":

$$A = L \cdot L = 150[mm] \cdot 150[mm] = \mathbf{22\,500\,mm^2}$$

Calculamos el volumen de material tras la contracción volumétrica:

$$V = V_o \cdot \frac{100 - 5,5}{100} = 800\,000[mm^3] \cdot \frac{100 - 5,5}{100} = \mathbf{756\,000\,mm^3}$$

Calculamos la altura del molde:

$$h = \frac{V}{A} = \frac{756\,000[mm^3]}{22\,500[mm^2]} = 33.60\,mm$$

Las dimensiones del molde final tras la contracción lineal son:

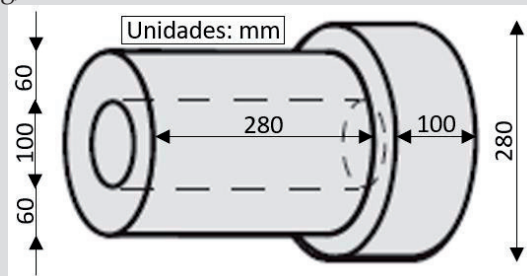
$$L_f = L \cdot \frac{100 - 1}{100} = 150[mm] \cdot \frac{100 - 1.6}{100} = 147.6\,mm$$

$$h_f = h \cdot \frac{100 - 1}{100} = 33.60[mm] \cdot \frac{100 - 1.6}{100} = 33.06\,mm$$

Problema 24: Fuerza de flotación

Se pretenden fabricar dos piezas con el mismo tamaño y forma según la imagen (unidades en mm). Una pieza de aluminio y la otra de plomo. Determine la fuerza de flotación que tiende a elevar el corazón durante el vertido en el moldeo en arena. El corazón tiene tamaño y forma según la imagen de la pieza que se quiere fabricar.

Datos: densidad de arena = 1.6 g/cm³, densidad de aluminio = 2.7 g/cm³, densidad de plomo = 11.3 g/cm³.



Solución.

$\rho_c = 1.6\,g/cm^3$ = densidad del corazón de arena.

$\rho_{Al} = 2.7\,g/cm^3$ = densidad del aluminio.

$\rho_{Pb} = 11.3\,g/cm^3$ = densidad del plomo.

$g = 9.81\,m/s^2$ = aceleración de la gravedad.

Primero hay que calcular el volumen del corazón, V_c . El corazón, según la imagen, es un cilindro con longitud $L = 380\,mm$ ($280+100$) y con diámetro $D = 100\,mm$.

$$V_c = \pi r^2 \cdot L = \pi 50^2 [mm^2] \cdot 380 [mm] = 2984513 \text{ mm}^3 = \mathbf{2984.5 \text{ cm}^3}$$

La fuerza de flotación para pieza de **aluminio**:

$$F_f = m_{Al} - m_c = \rho_{Al} V_c - \rho_c V_c$$

$$F_f = \left(2.7 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot 2984.5 [cm^3] \right) - \left(1.6 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot 2984.5 [cm^3] \right) = \mathbf{3.28 \text{ kg}}$$

$$F_f = 3.28 [kg] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] = \mathbf{32.2 \text{ N}}$$

La fuerza de flotación para pieza de **plomo**:

$$F_f = m_{material} - m_{corazón} = \rho_{Pb} V_c - \rho_c V_c$$

$$F_f = \left(11.3 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot 2984.5 [cm^3] \right) - \left(1.6 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot 2984.5 [cm^3] \right) = \mathbf{28.95 \text{ kg}}$$

$$F_f = 28.95 [kg] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] = \mathbf{284 \text{ N}}$$

La fuerza de flotación para pieza de aluminio es 32.2 N y para pieza de plomo 284 N. El plomo líquido tendrá mayor tendencia de desplazar el corazón de arena que el aluminio líquido.

Problema 25: Fuerza de flotación

Durante el montaje del molde de arena, para fabricar una pieza de cobre, se tiene que emplear un corazón de arena cuyo peso es 10 kg. Determine la fuerza de flotación que irá levantando el corazón durante el vertido.

Datos: densidad de arena = 1.6 g/cm³, densidad de cobre = 8.73 g/cm³.

Solución.

$m_c = 10 \text{ kg} = 10^4 \text{ g}$ = peso del corazón de arena.

$\rho_c = 1.6 \text{ g/cm}^3$ = densidad del corazón de arena.

$\rho_{Cu} = 8.73 \text{ g/cm}^3$ = densidad del cobre.

Primero hay que calcular el volumen del corazón:

$$V_c = \frac{m_c}{\rho_c} = \frac{10^4 [g]}{1.6 \left[\frac{g}{cm^3} \right]} = \mathbf{6 \text{ 250 cm}^3}$$

La fuerza de flotación es la diferencia entre el peso del cobre líquido desplazado, m_{Cu} , y el peso del corazón de arena, m_c .

$$F_f = m_{Cu} - m_c = (\rho_{Cu} \cdot V_c) - m_c$$

$$F_f = \left(8.73 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot 6\,250 [cm^3] \right) - 10^4 [g] = \mathbf{44.56\,kg}$$

$$F_f = 44.56 [kg] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] = \mathbf{437.16\,N}$$

El corazón de 10 kg experimentará una fuerza de flotación de 44.56 kg.

Problema 26: Fuerza de flotación y sujetadores

Se tiene que fabricar una pieza de plomo por moldeo en arena. Según el diseño de la pieza, hay que utilizar en el interior del molde un corazón de arena sujeto fijamente por un lado que puede soportar fuerzas de flotación de hasta 10 kg. Otro extremo del corazón no está en contacto con el molde y tendrá que estar sujeto por varios sujetadores. Un sujetador es capaz de soportar 2 kg de fuerza de flotación y el volumen del corazón son 2 litros. ¿Cuántos sujetadores hacen falta para soportar el resto de fuerza de flotación?

Datos: densidad de arena = 1.6 g/cm³, densidad de plomo = 11.3 g/cm³.

Solución.

$V_c = 2\,l = 2\,dm^3 = 2000\,cm^3$ = volumen del corazón de arena.

$\rho_c = 1.6\,g/cm^3$ = densidad del corazón de arena.

$\rho_{pb} = 11.3\,g/cm^3$ = densidad del plomo.

Primero se tiene que calcular la fuerza de flotación total. De la flotación total hay que descontar los 10 kg que están sujetos por el propio molde. Esta fuerza de flotación restante se compensará con los sujetadores.

$$F_f = m_{pb} - m_c = \rho_{m(pb)} V_c - \rho_c V_c$$

$$F_f = \left(11.3 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot 2000 [cm^3] \right) - \left(1.6 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot 2000 [cm^3] \right) = 22600 [g] - 3200 [g]$$

$$= \mathbf{19.4\,kg}$$

$$F_f - 10 [kg] = (19.4 - 10) [kg] = \mathbf{9.4\,kg}$$

$$\frac{9.4[kg]}{2 \left[\frac{kg}{sujetador} \right]} = 4.7 \text{ sujetadores} \approx \mathbf{5 \text{ sujetadores}}$$

Para soportar los 9.4 kg de fuerza de flotación restante hay que utilizar 5 sujetadores del corazón.

Problema 27: Límite máximo de la fuerza de flotación

En el interior de un molde de arena, el corazón está sujeto de tal modo que es capaz soportar como máximo 20 kg de fuerza de flotación. Se conoce que el volumen del corazón es de 2 500 cm³. ¿Es posible en estas condiciones fabricar la pieza de acero?

Datos: densidad de arena = 1.6 g/cm³, densidad de acero = 7.82 g/cm³.

Solución.

$F_{f(max)} = 20 \text{ kg} = (20 \cdot 9.81) \text{ N} = 196.2 \text{ N} = \text{fuerza de flotación.}$

$V_c = 2\,500 \text{ cm}^3 = \text{volumen del corazón de arena.}$

$\rho_c = 1.6 \text{ g/cm}^3 = \text{densidad del corazón de arena.}$

$\rho_{m(acero)} = 7.82 \text{ g/cm}^3 = \text{densidad del acero.}$

Hace falta determinar la fuerza de flotación real debido a las fuerzas que aplicará el acero fundido. Si la fuerza de flotación de acero fundido será menor que la fuerza de flotación que es capaz de soportar el corazón, entonces, la pieza puede ser fabricada de acero.

$$\begin{aligned} F_{f(real)} &= m_m - m_c = \rho_{m(acero)} V_c - \rho_c V_c \\ F_{f(real)} &= \left(7.82 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot 2500[cm^3] \right) - \left(1.6 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \cdot 2500[cm^3] \right) = \\ &= 19550[g] - 4000[g] = \mathbf{15.55 \text{ kg}} \\ F_{f(real)}(15.55 \text{ kg}) &\leq F_{f(max)}(20 \text{ kg}) \end{aligned}$$

La fuerza de flotación de acero es menor que la que es capaz soportar el corazón en el molde según el diseño. Por lo cual, la pieza puede ser fabricada de acero.

2.3. Fundición Centrífuga

Problema 28: Ecuación de factor G

Justifique la ecuación del factor G utilizando la velocidad rotacional del molde horizontal en revoluciones/min.

Solución.

GF = factor G, -.

N = velocidad rotacional del molde horizontal, revoluciones/min.

F = fuerza centrífuga, N.

W = fuerza de gravedad, N.

m = masa, kg.

v = velocidad, m/s.

R = radio interior del molde, m.

D = diámetro interior del molde y exterior del tubo fabricado, m.

g = aceleración de la gravedad, 9.81 m/s^2 .

$$v = (2\pi R) \cdot \left(\frac{N}{60}\right) = \frac{\pi RN}{30}$$

$$F = \frac{m \cdot v^2}{R}$$

$$W = m \cdot g$$

$$GF = \frac{F[N]}{W[N]} = \frac{\frac{m[kg] \cdot v^2 \left[\left(\frac{m}{s}\right)^2\right]}{R[m]}}{m[kg] \cdot g \left[\frac{m}{s^2}\right]} = \frac{m[kg] \cdot v^2 \left[\left(\frac{m}{s}\right)^2\right]}{R[m] \cdot m[kg] \cdot g \left[\frac{m}{s^2}\right]} = \frac{\left(\frac{2\pi R[m]N \left[\frac{rev}{min}\right]}{60 \left[\frac{s}{min}\right]}\right)^2}{R[m] \cdot g \left[\frac{m}{s^2}\right]} =$$

$$= \frac{R[m] \left(\frac{\pi N \left[\frac{rev}{min}\right]}{30 \left[\frac{s}{min}\right]}\right)^2}{g \left[\frac{m}{s^2}\right]} = \frac{R \left(\frac{\pi N}{30}\right)^2}{g} \rightarrow N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{GF \cdot g}{R}}$$

Problema 29: Fundición centrífuga real horizontal 1

Se lleva a cabo una operación de fundición centrífuga real horizontal. La pieza en forma de tubo abierto por ambos lados, tiene que tener 1 metro de longitud, 18 cm de diámetro interior y 2 cm de espesor de la pared. La velocidad rotacional del molde horizontal es 500 rev/min.

- a) ¿Cuál sería, en estas condiciones, el valor de factor G?
- b) ¿Es posible fabricar de este modo un tubo de acero? Si no es posible, calcule una solución manteniendo el diseño de la pieza sin cambios.

Solución.

$N = 500$ revoluciones/min = velocidad rotacional del molde horizontal,

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$ = aceleración de la gravedad,

$L = 1 \text{ m}$ = longitud horizontal del fundido,

$D = 18 + 2 + 2 = 22 \text{ cm} = 0.22 \text{ m}$ = diámetro interior del molde y exterior del tubo fabricado.

$R = 0.11 \text{ m}$ = radio interior del molde y exterior del tubo fabricado.

- a) Se calcula el factor G de la fundición centrífuga real horizontal:

$$GF = \frac{R \left(\frac{\pi N}{30} \right)^2}{g} = \frac{0.11 [m] \left(\frac{\pi \cdot 500 \left[\frac{rev}{min} \right]}{30 \left[\frac{s}{min} \right]} \right)^2}{9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]} = 30.74$$

- b) El valor GF sale a 30.74. Si el factor G es menor que 60, el metal líquido no se verá forzado a permanecer contra la pared del molde durante la mitad superior de la trayectoria circular, sino que el metal fundido “lloverá” dentro del molde. Como no es permitido cambiar las dimensiones de la pieza a fabricar, hay que ir ajustando la velocidad rotacional del molde horizontal hasta alcanzar el mínimo de factor G, que son los 60.

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{GF \cdot g}{R}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{60 [-] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]}{0.11 [m]}} = 699 \frac{rev}{min}$$

Con velocidad rotacional de unos 699 rev/min se consigue teóricamente el valor de GF mínimo aceptable de unos 60.

Problema 30: Fundición centrífuga real horizontal 2

Se necesita fabricar una pieza de aluminio tubular larga mediante el método de fundición centrífuga real en un molde horizontal. La pieza de aluminio, tiene que tener diámetro interior de 27,5 cm, diámetro exterior de 30 cm y tiene que pesar 1 kg. Factor G para aluminio es 75. Determine:

- La velocidad rotacional en rotaciones/min y la velocidad en m/s.
- Fuerza centrífuga y fuerza de gravedad.

Solución.

$D = 30 \text{ cm} = 0.3 \text{ m}$ = diámetro interior del molde y exterior del tubo fabricado.

$R = 0.15 \text{ m}$ = radio interior del molde.

$GF = 75$ = factor G.

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$ = aceleración de la gravedad.

$m = 1 \text{ kg}$ = masa.

- Hay que tener en cuenta que el diámetro interior del molde tiene el mismo valor que diámetro exterior del tubo que se está fabricando. La velocidad rotacional del molde:

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{GF \cdot g}{R}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{75[-] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2}\right]}{0.15[m]}} = 669 \frac{rev}{min}$$

La velocidad del molde:

$$v = (2\pi R) \cdot \left(\frac{N}{60}\right) = (2\pi \cdot 0.15[m]) \cdot \frac{669 \left[\frac{rev}{min}\right]}{60 \left[\frac{s}{min}\right]} = 10.5 \frac{m}{s}$$

La velocidad rotacional es 669 rotaciones/min, lo que corresponde a una velocidad de 10.5 m/s.

- Fuerza centrífuga:

$$F = \frac{m \cdot v^2}{R} = \frac{1[kg] \cdot 10.5^2 \left[\left(\frac{m}{s}\right)^2\right]}{0.15[m]} = 735 \frac{kg \cdot m}{s^2} = 735 \text{ N}$$

Fuerza de gravedad:

$$GF = \frac{F}{W} \rightarrow W = \frac{F}{GF} = \frac{735[N]}{75[-]} = 9.8 \text{ N}$$

ó

$$W = m \cdot g = 1[kg] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 9.8 \frac{kgm}{s^2} = 9.8 \text{ N}$$

Problema 31: Fundición centrífuga real vertical (tubo de Al)

¿Qué velocidad rotacional del molde mínima hay que aplicar para fabricar un tubo de aluminio mediante fundición centrífuga real vertical, si tiene un diámetro exterior 30 cm, un diámetro interior máximo 27.5 cm y una longitud 45 cm?. Se tiene que cumplir que el diámetro interior mínimo sea 25 cm.

Solución.

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$ = aceleración de la gravedad.

$L = 45 \text{ cm} = 0.45 \text{ m}$ = longitud vertical del fundido.

$D_{i,i} = 25 \text{ cm} \rightarrow R_{i,i} = 25 \text{ cm}/2 = 0.25 \text{ m}/2 = 0.125 \text{ m}$ = radio interior de la parte inferior del fundido.

$D_{i,s} = 27.5 \text{ cm} \rightarrow R_{i,s} = 27.5 \text{ cm}/2 = 0.275 \text{ m}/2 = 0.1375 \text{ m}$ = radio interior de la parte superior del fundido.

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2gL}{R_{i,s}^2 - R_{i,i}^2}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2 \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot 0.45[m]}{0.1375^2[m^2] - 0.125^2[m^2]}} = 495 \frac{\text{rev.}}{\text{min}}$$

La centrífuga vertical tiene que trabajar por lo menos con 495 revoluciones/minuto.

Problema 32: Fundición centrífuga real vertical (anillo de Pb)

Se quieren fabricar anillos de Pb por fundición centrífuga real vertical. El equipo de centrifugación es capaz de girar con el molde con 500 revoluciones por minuto. La pieza, tiene que tener una longitud de 30 cm, un diámetro exterior de 25 cm y el diámetro interior en la parte superior del fundido debe ser 23 cm. Determine el diámetro interior en la parte inferior de la pieza.

Solución.

$N = 500$ revoluciones/min = velocidad rotacional del molde vertical.

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$ = aceleración de la gravedad.

$L = 30 \text{ cm} = 0.3 \text{ m}$ = longitud vertical del fundido.

$D_{i,s} = 23 \text{ cm} \rightarrow R_{i,s} = 23 \text{ cm}/2 = 0.23 \text{ m}/2 = 0.115 \text{ m}$ = radio interior de la parte superior del fundido.

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2gL}{R_{i,s}^2 - R_{i,i}^2}} \rightarrow R_{i,i} = \sqrt{R_{i,s}^2 - \frac{30^2 2gL}{\pi^2 N^2}}$$

$$= \sqrt{0.115^2 [\text{m}^2] - \frac{30^2 \cdot 2 \cdot 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 0.3 [\text{m}]}{\pi^2 \cdot 500^2 \left[\left(\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right)^2 \right]}} = \mathbf{0.105 \text{ m}}$$

$$R_{i,i} = 0.105 \text{ m} = 10.5 \text{ cm} \Rightarrow \mathbf{D_{i,i} = 2R_{i,i} = 2 \cdot 10.5 [\text{cm}] = 21 \text{ cm}}$$

El diámetro interior de la parte inferior del fundido será de 21 cm.