

# Alimentadores

1815 Fundición

Dr. Luis Enrique Jardón Pérez


Departamento de Metalurgia

Facultad de Química, UNAM



# Introducción

¿Qué es un alimentador?




Cuando un metal en estado líquido pasa al estado sólido (hasta temperatura ambiente) sufre 3 contracciones:

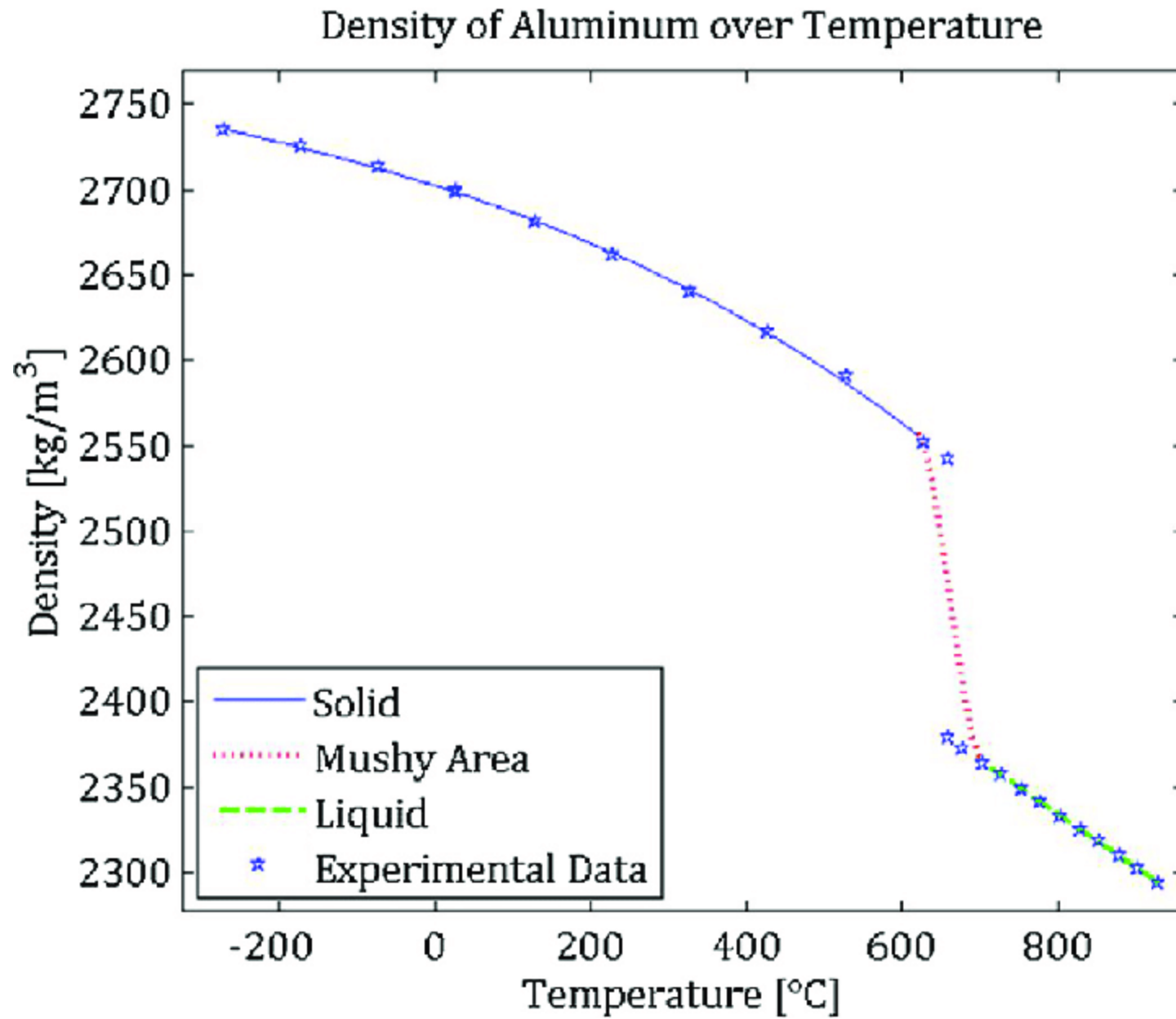
- Contracción líquido – líquido
- Contracción por solidificación
- Contracción sólido – sólido

Las dos primeras dan origen a rechupes en las piezas sólidas. Para evitar la presencia de tales rechupes se diseñan y calculan alimentadores

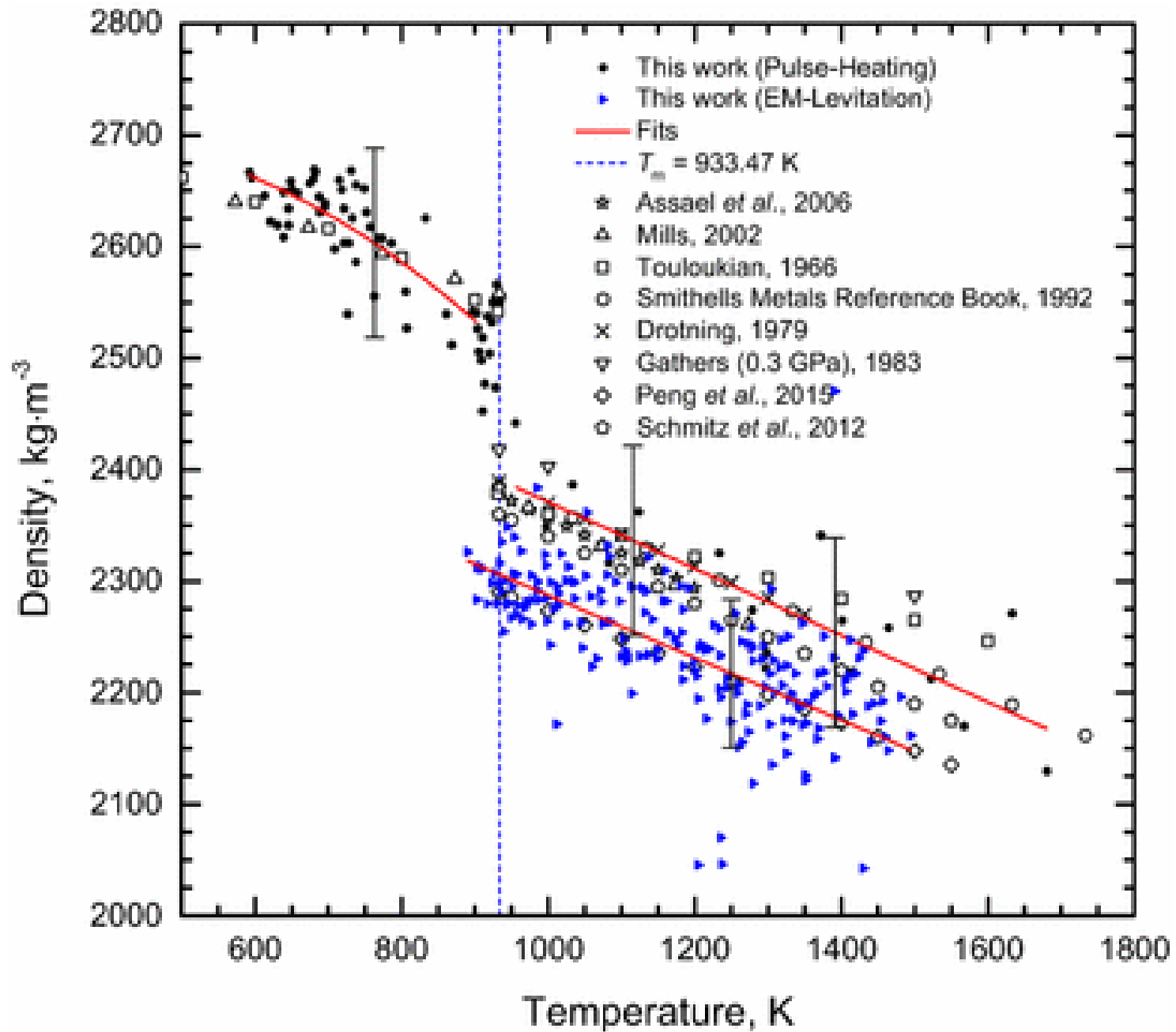
La tercera se debe de considerar para el diseño y cálculo de modelos (de fundición) ya que la pieza disminuye dimensiones al bajar desde una temperatura elevada, en estado sólido, hasta la temperatura ambiente



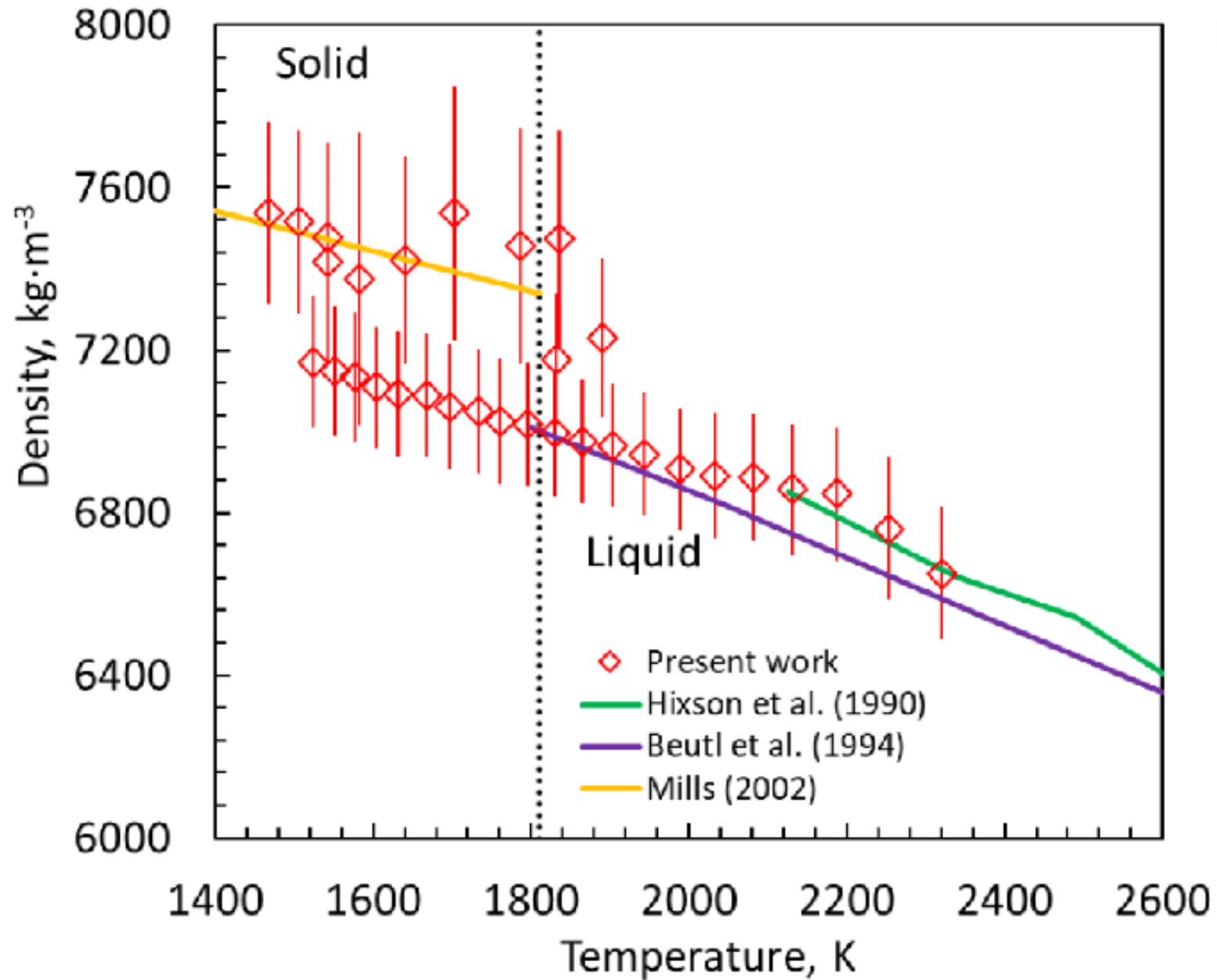
Densidad del aluminio puro contra temperatura



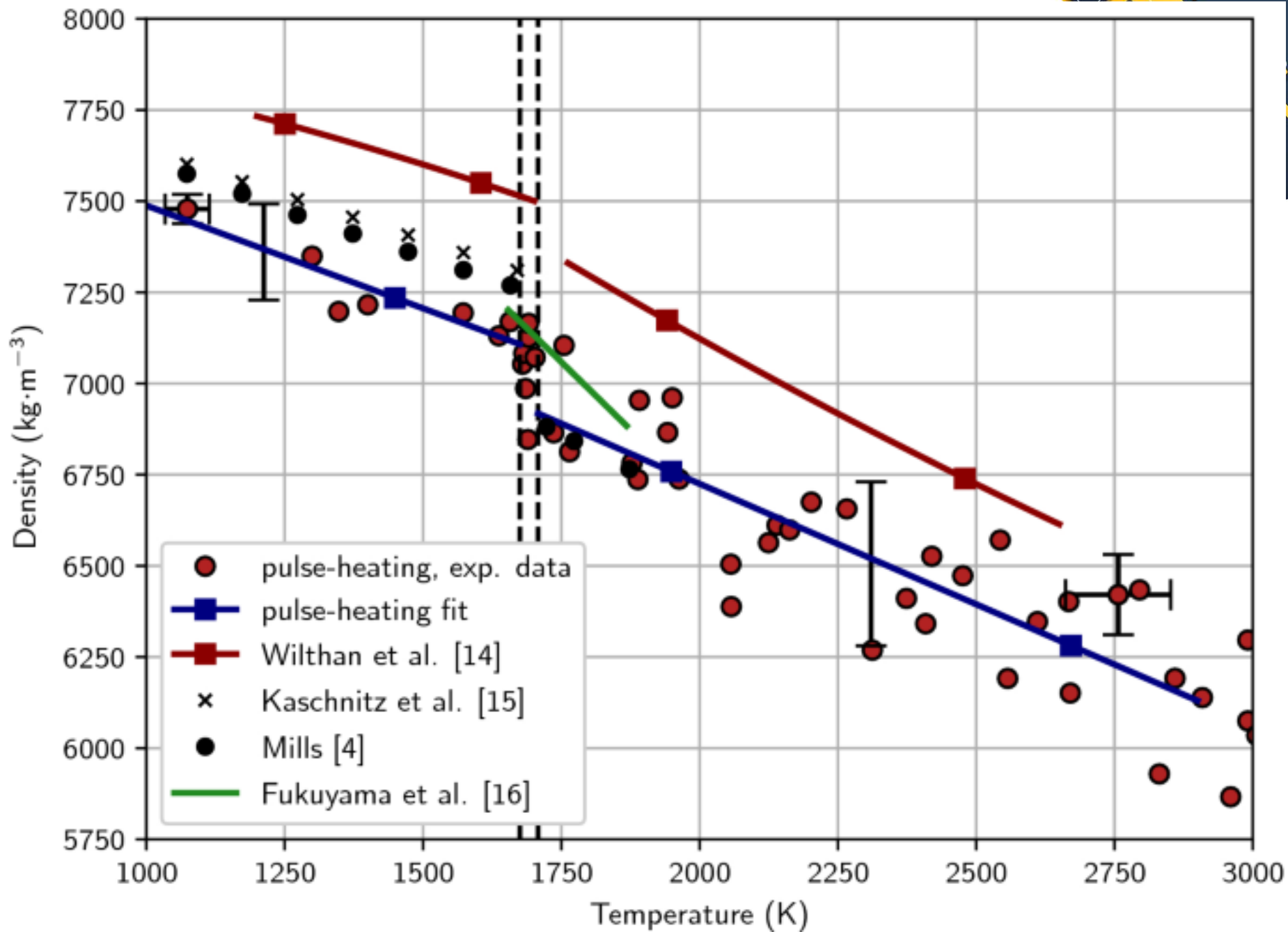
Densidad del aluminio puro  
contra temperatura



Densidad del hierro  
puro contra  
temperatura

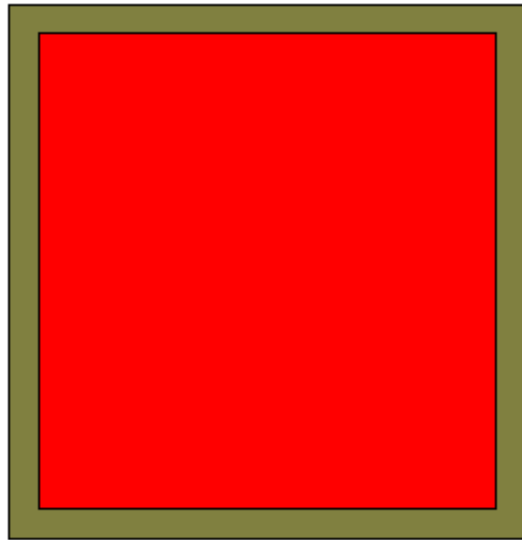


# Densidad del acero 316L contra temperatura



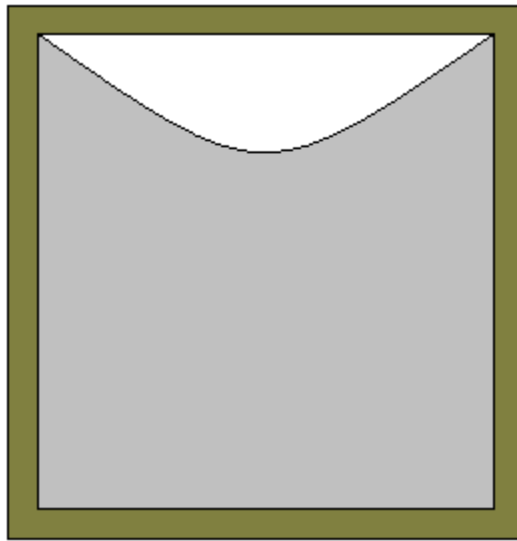
Se forman 3 tipos de rechupe:

- Rechupe localizado
- Rechupe disperso
- Rechupe mixto



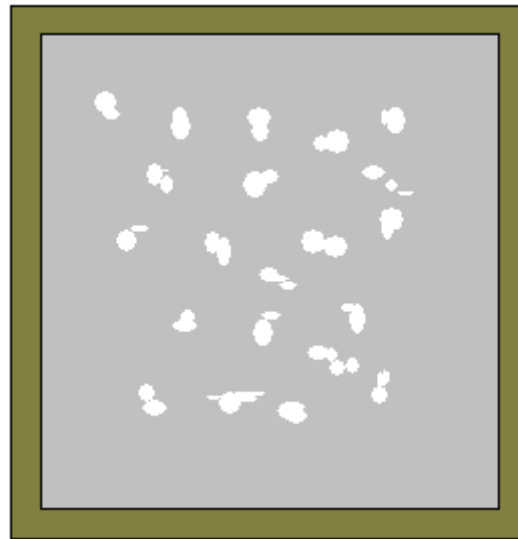
a) Metal líquido

ó



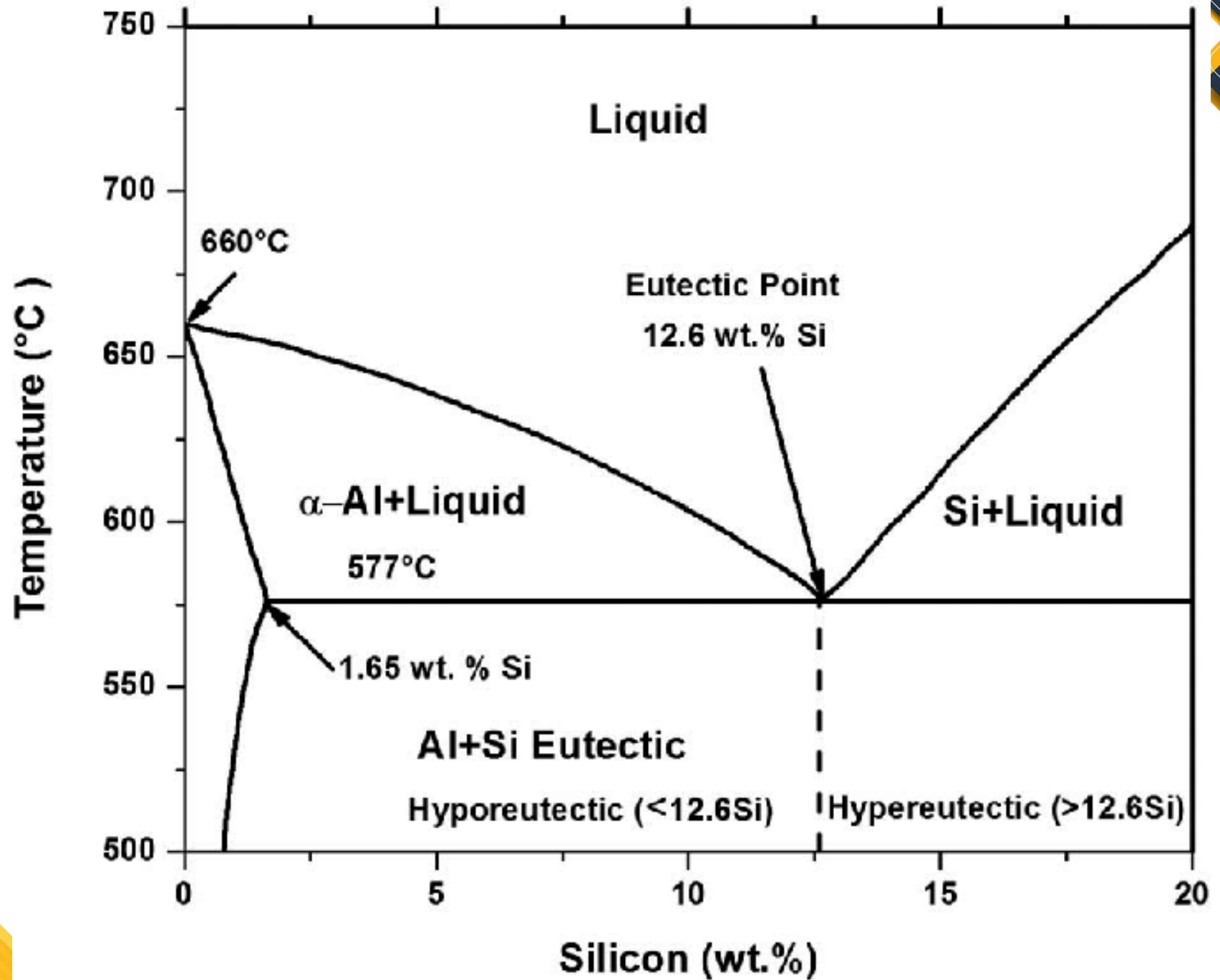
b) Rechupe localizado  
Metal sólido

Aleaciones de rango corto de solidificación  
(ARCS)




c) Rechupe Disperso  
Metal sólido

Aleaciones de rango largo de solidificación  
(ARLS)







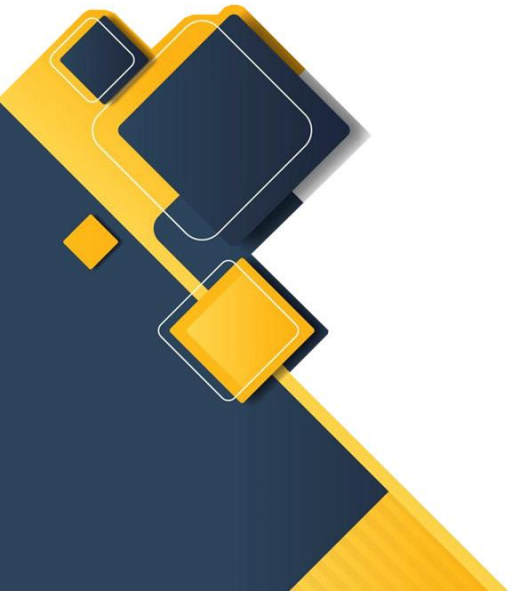
¿Que es un alimentador?

Es un recipiente (reservorio) de metal líquido cuya función es evitar que se efectúe el rechupe o contracción\* en la pieza.

Tal rechupe se traslada al alimentador, quedando de esta forma la pieza sin rechupe.

El rechupe no se puede evitar o suprimir, solamente se traslada al alimentador, en otras palabras el alimentador tiene dos rechupes: el de la pieza y el del alimentador

\*Rechupe debido a dos contracciones: líquido – líquido y por solidificación



# Formas de los alimentadores

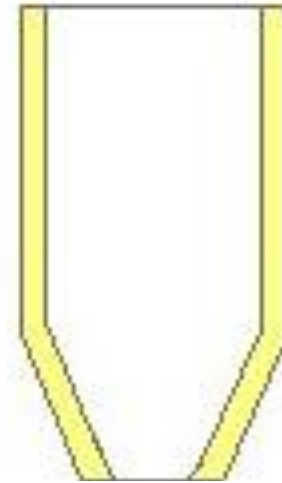
Open



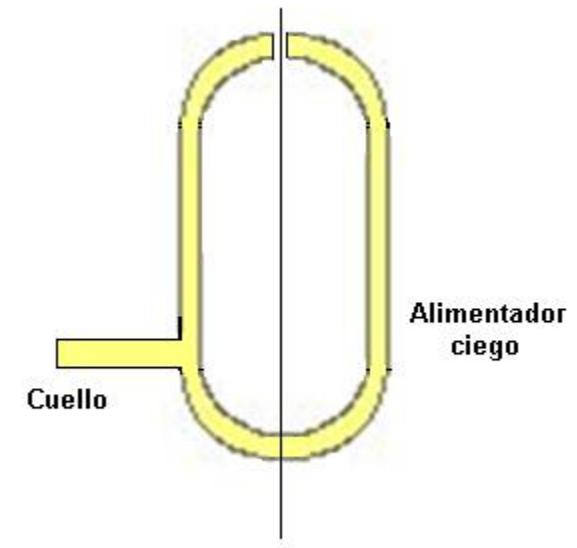
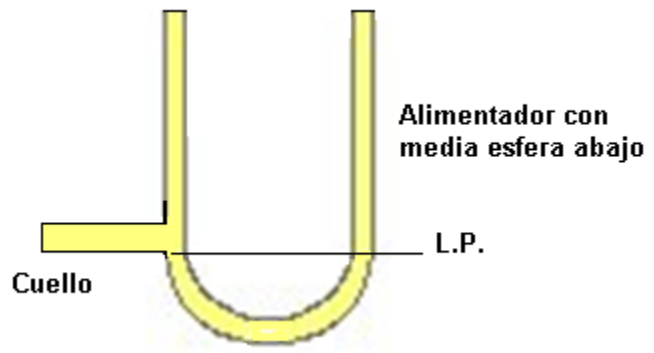
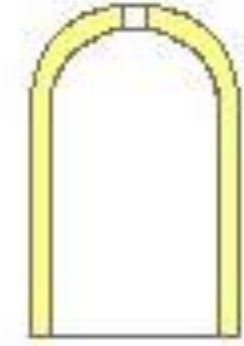
Oval



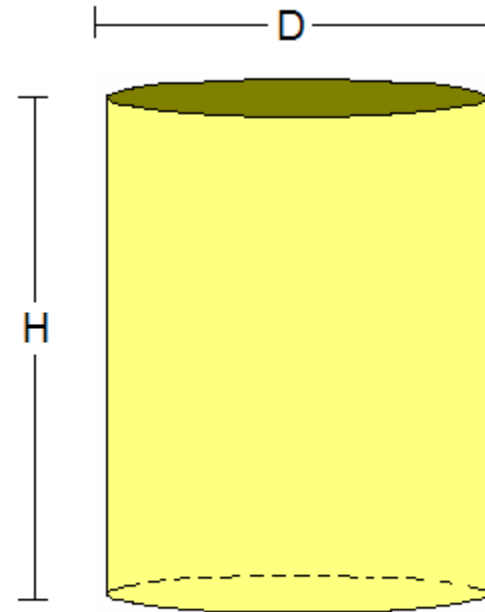
Neck-Down



Domed

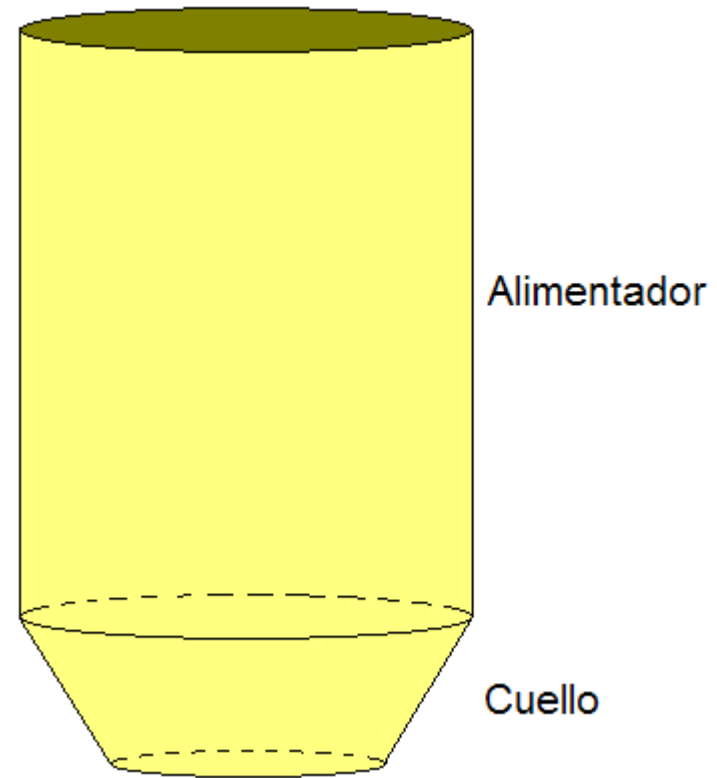


## Alimentador cilindrico. Relación H/D



$$\frac{H}{D} = 0.5 \text{ hasta } 1.5$$

# Alimentador cilíndrico con cuello.



Condiciones para el funcionamiento de un alimentador:

### Tres reglas básicas

- Abierto a la atmósfera
- Altura superior del alimentador mayor a la altura superior de la pieza
- Tiempo de solidificación del alimentador mayor al tiempo de solidificación de la pieza

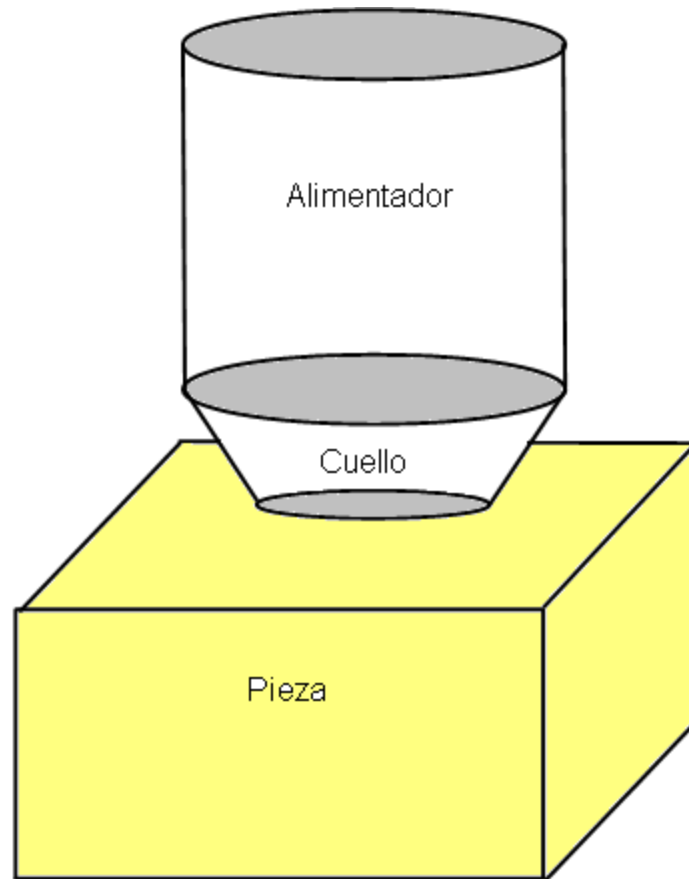
$$t_{sA} > t_{sp}$$

$t_{sA}$  = Tiempo total de solidificación del alimentador

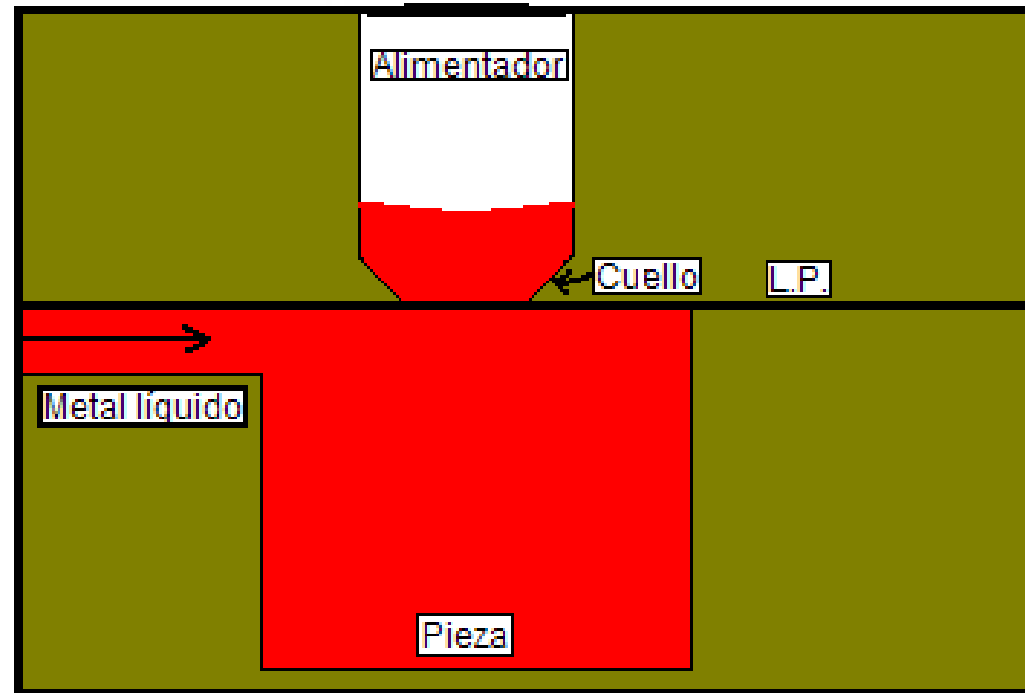
$t_{sP}$  = Tiempo total de solidificación de la pieza



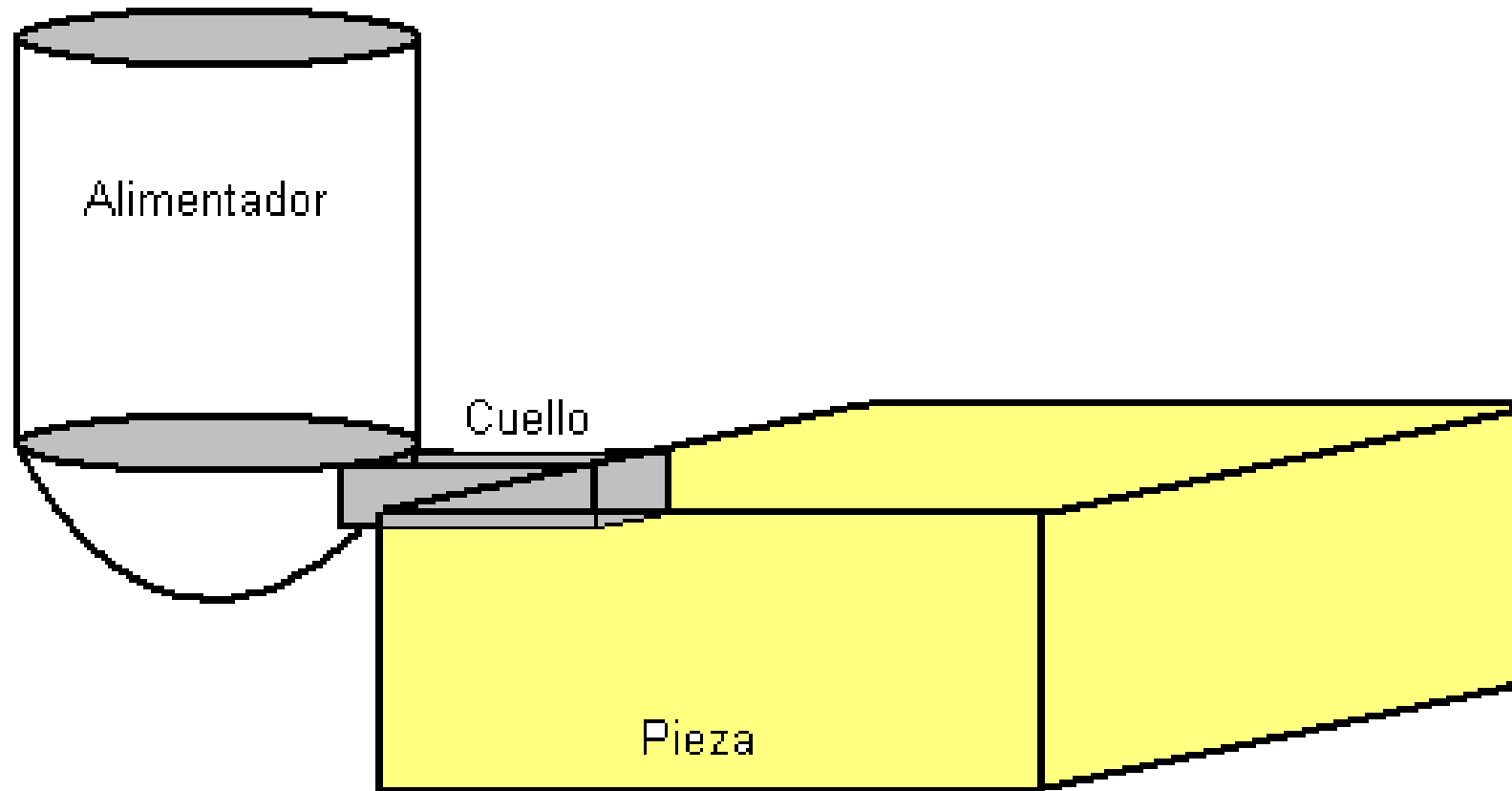
# Tipos de alimentadores



Alimentador Superior  
(alimentador frío)



Alimentador superior  
Frío

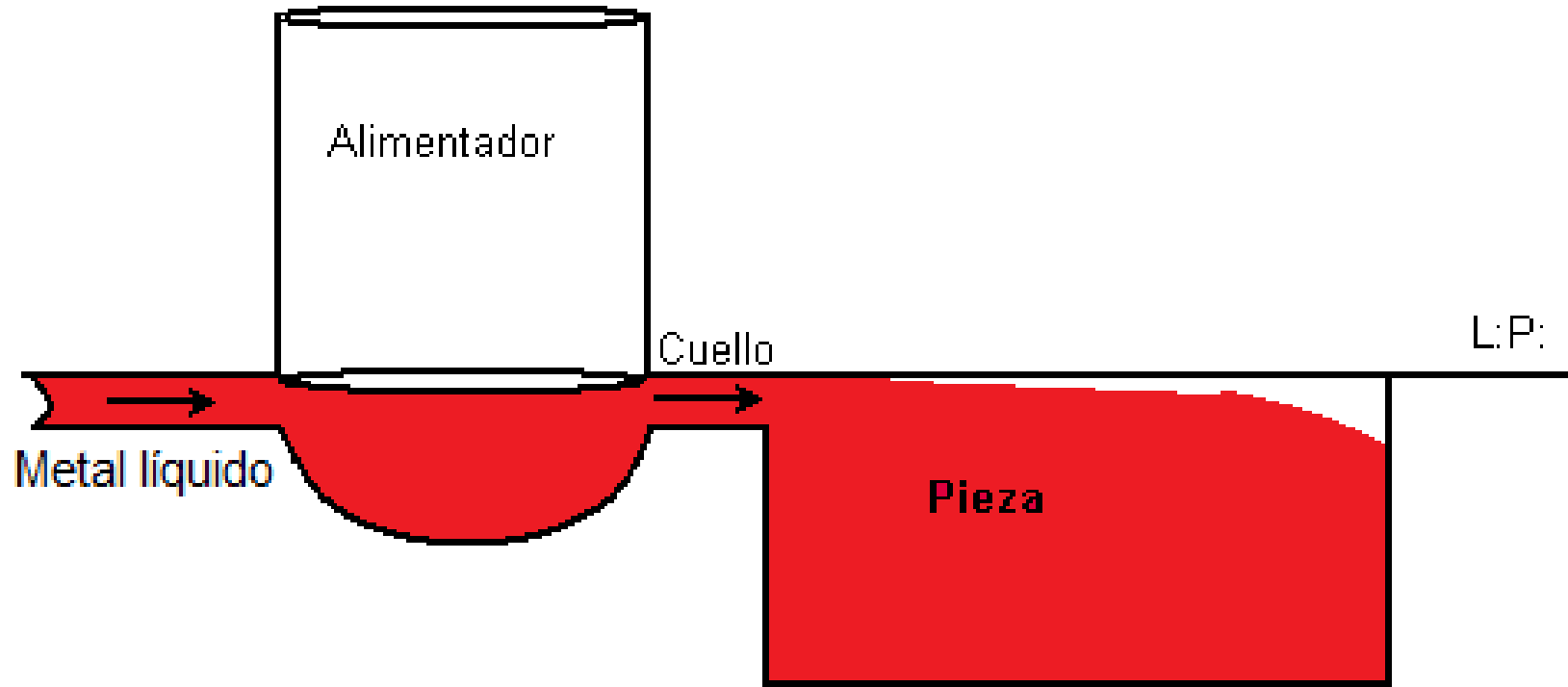


Alimentador

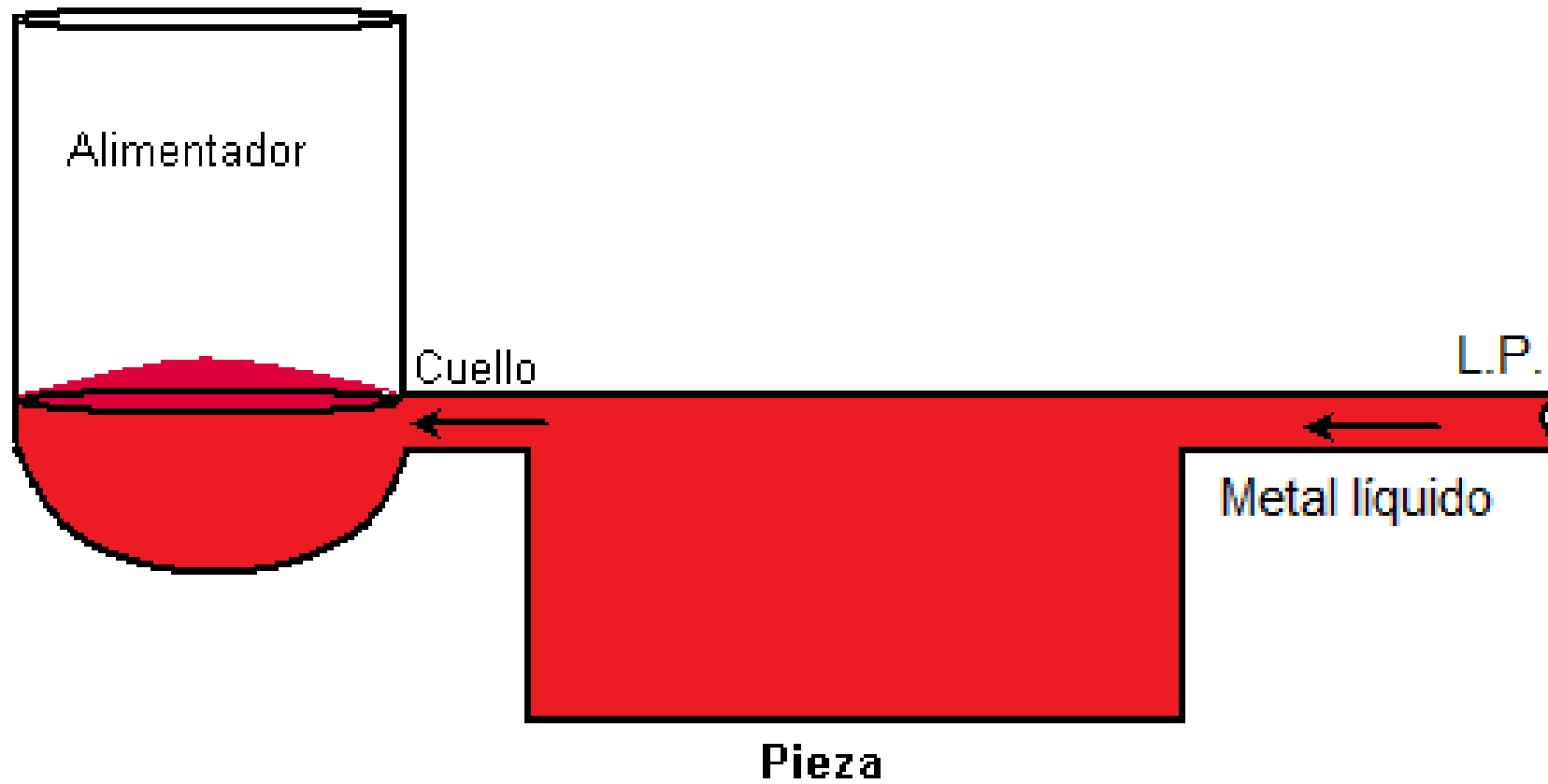
Cuello

Pieza

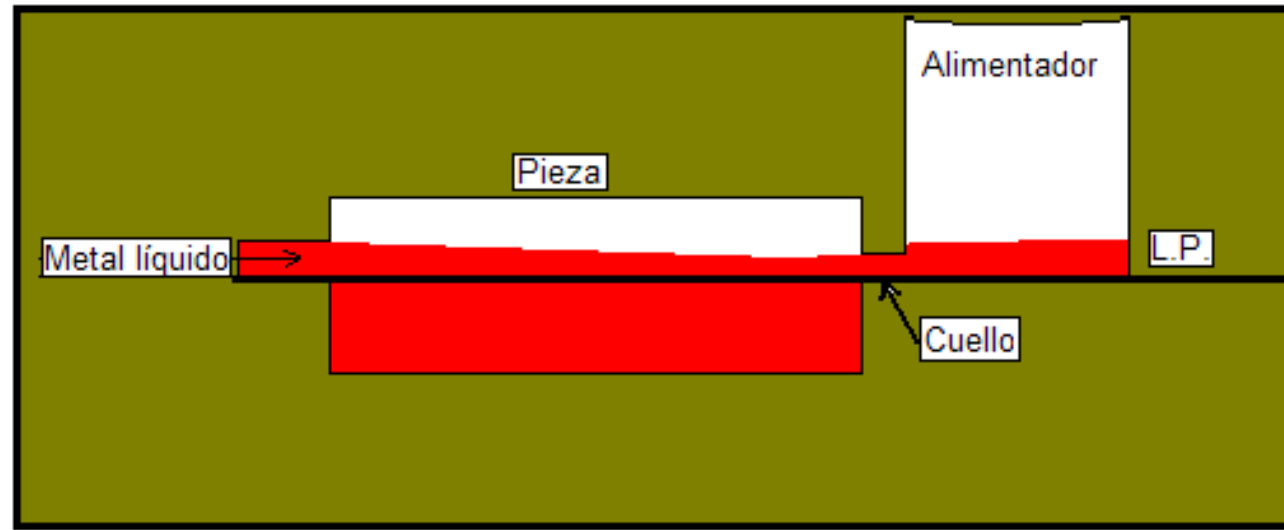
Alimentador lateral



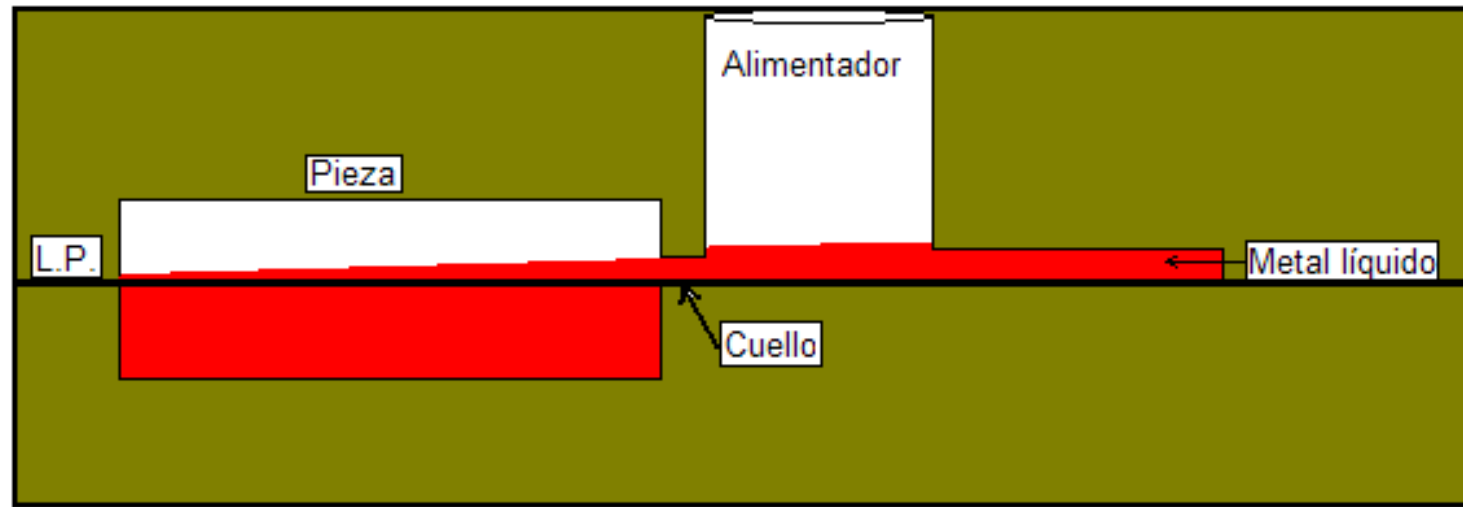
Alimentador lateral  
(alimentador caliente)



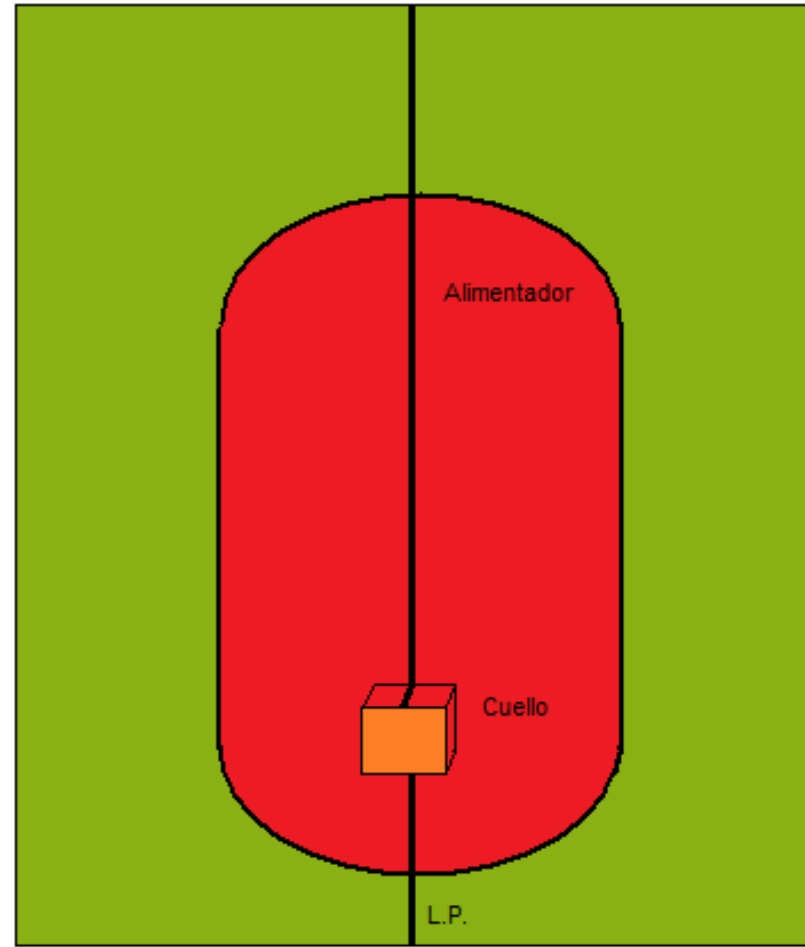
Alimentador lateral  
(alimentador frío)



Alimentador lateral frío



Alimentador lateral caliente

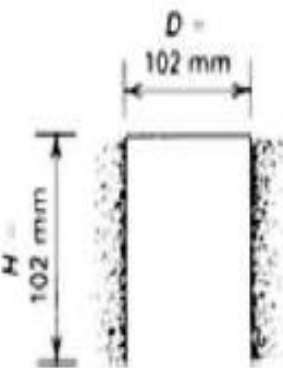
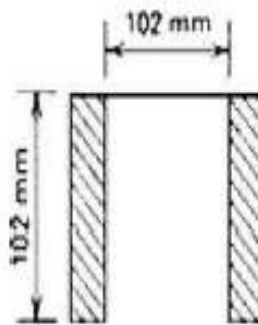
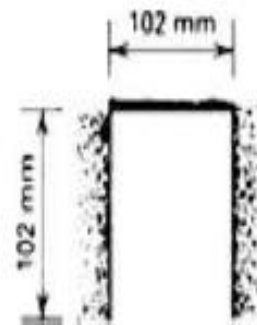
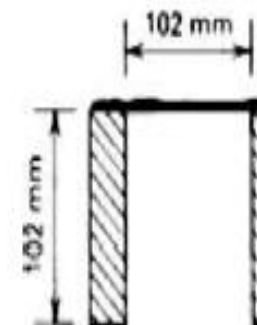


Alimentador Ciego

Moldeo vertical

## Efecto de varios sistemas de alimentadores en los tiempos de solidificación de varias aleaciones

Table 3 Effect of risering systems on the solidification times of various alloys

Alloy cast	Radiation loss through top, %	Solidification time, min			
		Sand riser/open end	Sleeved riser/open top	Sand riser/insulated top	Sleeved riser/insulated top
					
Steel	42	5	7.5	13.4	43.0
Copper	26	8.2	15.1	14.0	45.0
Aluminum	8	12.3	31.1	14.3	45.6

Source: Ref 31

# Cálculo de alimentadores

Fundamentos

## Ecuación de Chvorinov

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{T_M - T_O}{\rho_S H} \right) \sqrt{k_m \rho_m C_m} \sqrt{t}$$

S = Espesor solidificado

T<sub>M</sub> = Temperatura de solidificación del metal (puro)

T<sub>O</sub> = Temperatura del molde (ambiente)

H = Entalpia de solidificación

ρ = Densidad del sólido

k<sub>m</sub> = Conductividad térmica del medio de moldeo

ρ<sub>m</sub> = Densidad del medio de moldeo

C<sub>m</sub> = calor específico del medio de moldeo

t = tiempo de solidificación

**Se aplica a metales puros vaciados a temperatura de solidificación**

Ecuación de Chvorinov modificada

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{T_V - T_O}{\rho_S \tilde{H} + \rho_L C_L \Delta T} \right) \sqrt{k_m \rho_m C_m} \sqrt{t}$$

S = Espesor solidificado

T<sub>v</sub> = Temperatura de vaciado T<sub>v</sub> > T<sub>M</sub>

T<sub>o</sub> = Temperatura del molde (ambiente)

$\tilde{H}$  = Entalpia promedio de solidificación

$\rho_s$  = Densidad del sólido

$\rho_L$  = Densidad del líquido

$\Delta T = (T_v - T_M)$

C<sub>L</sub> = calor específico del líquido

k<sub>m</sub> = Conductividad térmica del medio de moldeo

$\rho_m$  = Densidad del medio de moldeo

C<sub>m</sub> = calor específico del medio de moldeo

t = tiempo de solidificación

Se aplica a aleaciones y a temperaturas de vaciado superiores a la de solidificación

De la diapositiva anterior

$$S = \frac{V}{A} = Ms \quad \text{Módulo de Solidificación}$$

$$k = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{T_V - T_0}{\rho_S \tilde{H} + \rho_L C_L \Delta T} \right) \sqrt{k_m \rho_m C_m}$$

Por tanto

$$Ms = k \sqrt{t_S}$$

$$S = \frac{V}{A} = Ms$$

S = espesor solidificado

V = Volumen de la pieza (o parte de la pieza)

A = Área de transferencia de calor

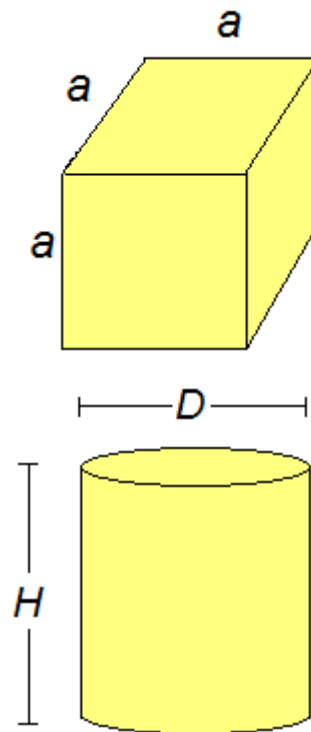
Ms = Módulo de solidificación

De Chvorinov  $Ms = k\sqrt{t_s}$

Ms = módulo de solidificación, por ejemplo para un:

Cubo  $V = a^3$   $A = 6a^2$   
 $V/A = a^3/6a^2 = a/6 = Ms$

Cilindro condición  $H = D$   
 $V = (\pi/4)D^2H = (\pi/4)D^3$   
 $A = 2(\pi/4)D^2 + \pi DH = (\pi/2)D^2 + \pi D^2 = (3/2)\pi D^2$   
 $V/A = (\pi/4)D^3 / (3/2)\pi D^2 = D/6 = Ms$



## Cálculo de Alimentadores, según Chvorinov:

Considera que  $t_{SA} = 1.25 t_{SP}$ , cumpliendo con una de las tres reglas para alimentadores:

$$t_{SA} > t_{SP}$$

De:  $M_s = k\sqrt{t_s}$

Para el alimentador  $M_{SA} = k_A\sqrt{t_{SA}}$  Despejando  $\left(\frac{M_{SA}}{k_A}\right)^2 = t_{SA}$

Para la pieza  $M_{SP} = k_P\sqrt{t_{SP}}$  Despejando  $\left(\frac{M_{SP}}{k_P}\right)^2 = t_{SP}$

Por tanto, si:  $t_{SA} = 1.25t_{SP}$   $\left(\frac{M_{SA}}{k_A}\right)^2 = 1.25\left(\frac{M_{SP}}{k_P}\right)^2$

$$\sqrt{\left(\frac{M_{SA}}{k_A}\right)^2} = \sqrt{1.25\left(\frac{M_{SP}}{k_P}\right)^2} \quad \frac{M_{SA}}{k_A} = 1.12\frac{M_{SP}}{k_P}$$

Finalmente

$$M_{SA} = 1.12M_{SP}\frac{k_A}{k_P}$$

$t_{SA}$  = Tiempo total de solidificación del alimentador  
 $t_{SP}$  = Tiempo total de solidificación de la pieza

Ejemplo; Calcular las dimensiones del alimentador para las siguientes condiciones

Pieza: cubo con  $a = 10 \text{ cm}$

Alimentador: Cilindro con  $H/D = 1$

$k_A/K_P = 1$ , esto significa el mismo medio de moldeo, tanto para alimentador como para pieza

Para el cubo  $M_{SP} = a/6$

Para el, cilindro  $M_{SA} = D/6$ , Si  $H/D=1$

Ahora, de  $M_{SA} = 1.12 M_{SP} (k_A/K_P)$

$D/6 = 1.12 (10/6) (1)$ , por tanto

$D = 11.2 \text{ cm}$

y si  $H/D = 1$ , entonces

$H = 11.2 \text{ cm}$

Altura = diámetro =  $11.2 \text{ cm}$

Relación de constantes  $k_A/k_P$

$k_A/k_P = 1$  para la mayoría de procesos de fundición, sin embargo para optimizar el tamaño de los alimentadores y aumentar el rendimiento de metal se pretende que:

$$k_A/k_P < 1$$

La forma de determinar el valor de esta relación es la siguiente:

$$k_A = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{T_V - T_O}{\rho_S \tilde{H} + \rho_L C_L \Delta T} \right) \sqrt{k_{mA} \rho_{mA} C_{mA}}$$

$$k_P = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{T_V - T_O}{\rho_S \tilde{H} + \rho_L C_L \Delta T} \right) \sqrt{k_{mP} \rho_{mP} C_{mP}}$$

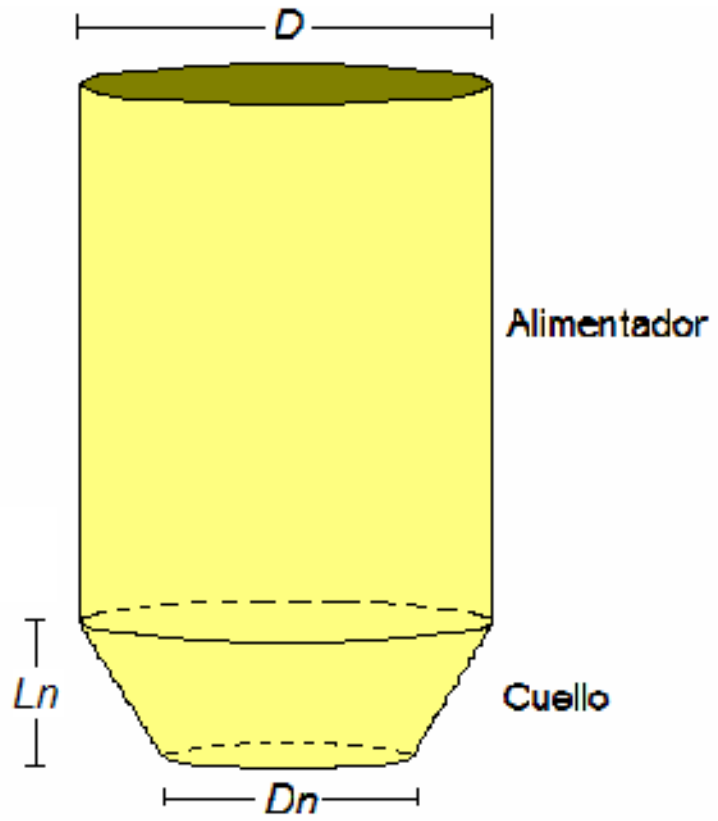
$$\frac{k_A}{k_P} = \frac{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{T_V - T_O}{\rho_S \tilde{H} + \rho_L C_L \Delta T} \right) \sqrt{k_{mA} \rho_{mA} C_{mA}}}{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{T_V - T_O}{\rho_S \tilde{H} + \rho_L C_L \Delta T} \right) \sqrt{k_{mP} \rho_{mP} C_{mP}}}$$

Quedando finalmente:

$$\frac{k_A}{k_P} = \frac{\sqrt{k_{mA} \rho_{mA} C_{mA}}}{\sqrt{k_{mP} \rho_{mP} C_{mP}}} = \sqrt{\frac{k_{mA} \rho_{mA} C_{mA}}{k_{mP} \rho_{mP} C_{mP}}}$$



# Dimensiones de los cuellos de los alimentadores



Dimensiones para el cuello de un alimentador superior

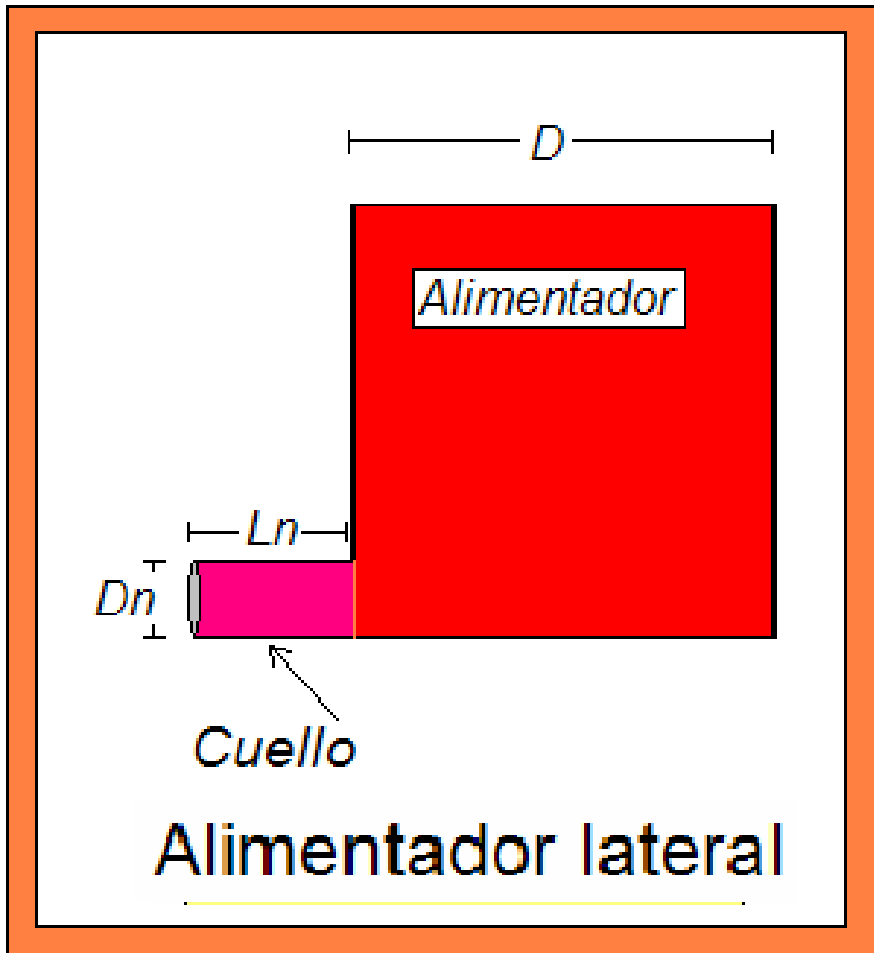
$D_n$  = diámetro del cuello

$D_n = L_n + 0.2 D$

$L_n$  = Altura del cuello

$L_n = D/2$  máx

$D/3$  recomendado



Dimensiones para el cuello de un alimentador lateral

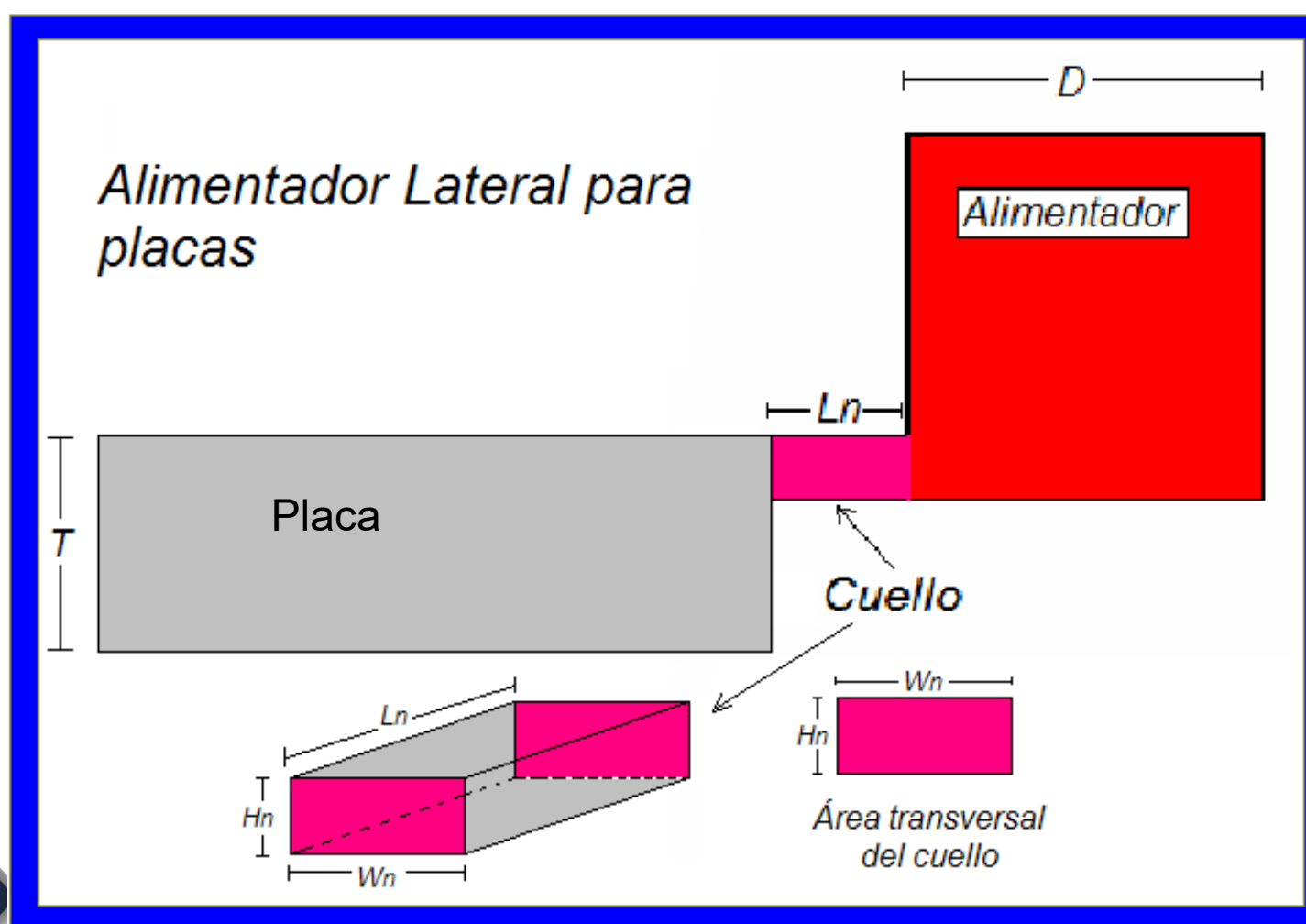
$D_n$  = diámetro del cuello

$D_n = L_n + 0.1 D$

$L_n$  = Longitud del cuello

$L_n = D/2$  máx

$D/3$  recomendado



Dimensiones para el cuello de un alimentador lateral para placas (pieza)

$T$  = Espesor de la placa

$H_n$  = Altura del cuello

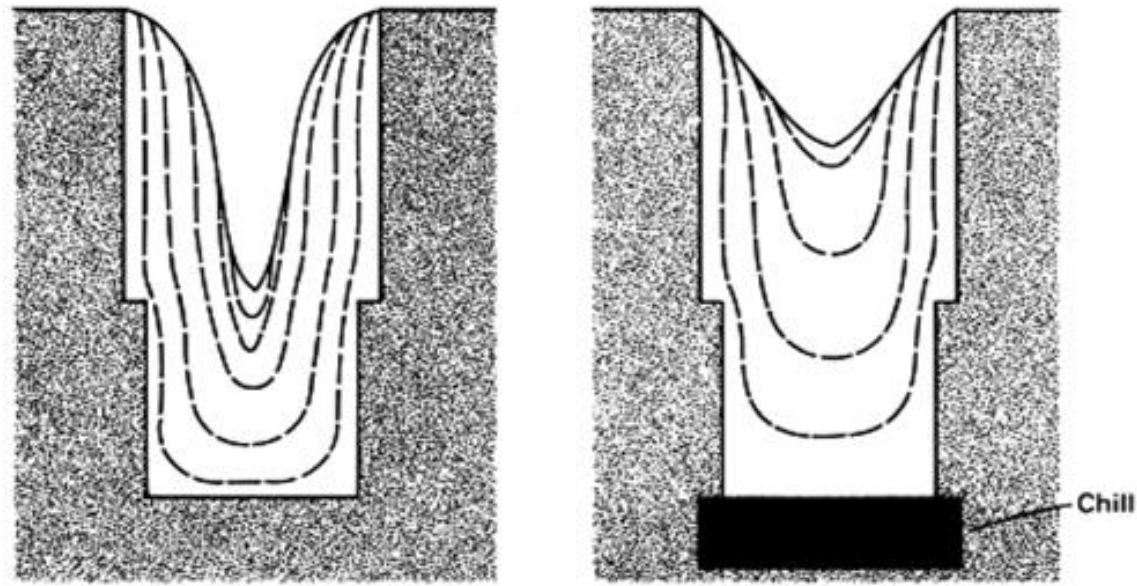
$$H_n = 0.6T \text{ a } 0.8T$$

$L_n$  = Longitud del cuello

$W_n$  = Ancho del Cuello

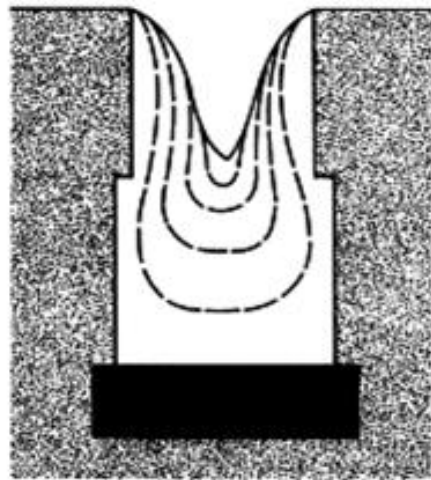
$$L_n = D/3 \text{ máx}$$

$$W_n = 2.5 L_n + 0.18 D$$

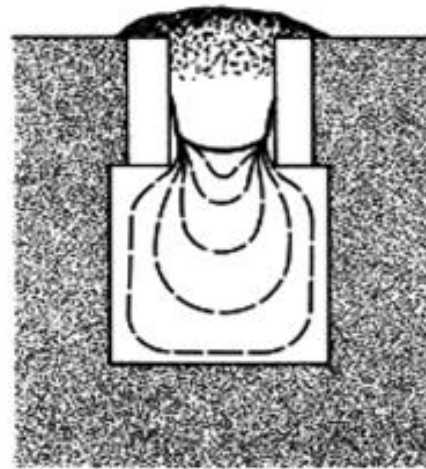


(a)

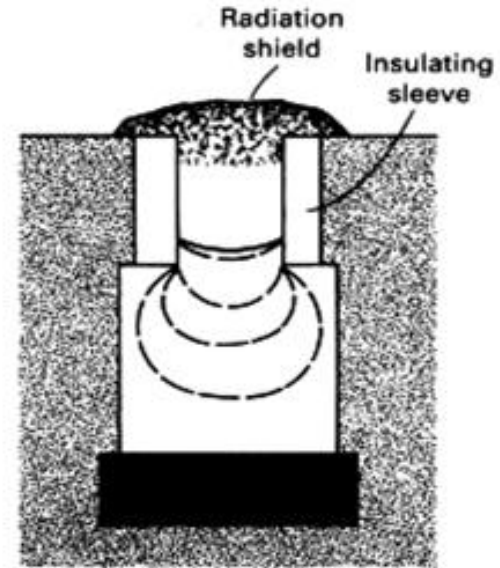
(b)



(c)

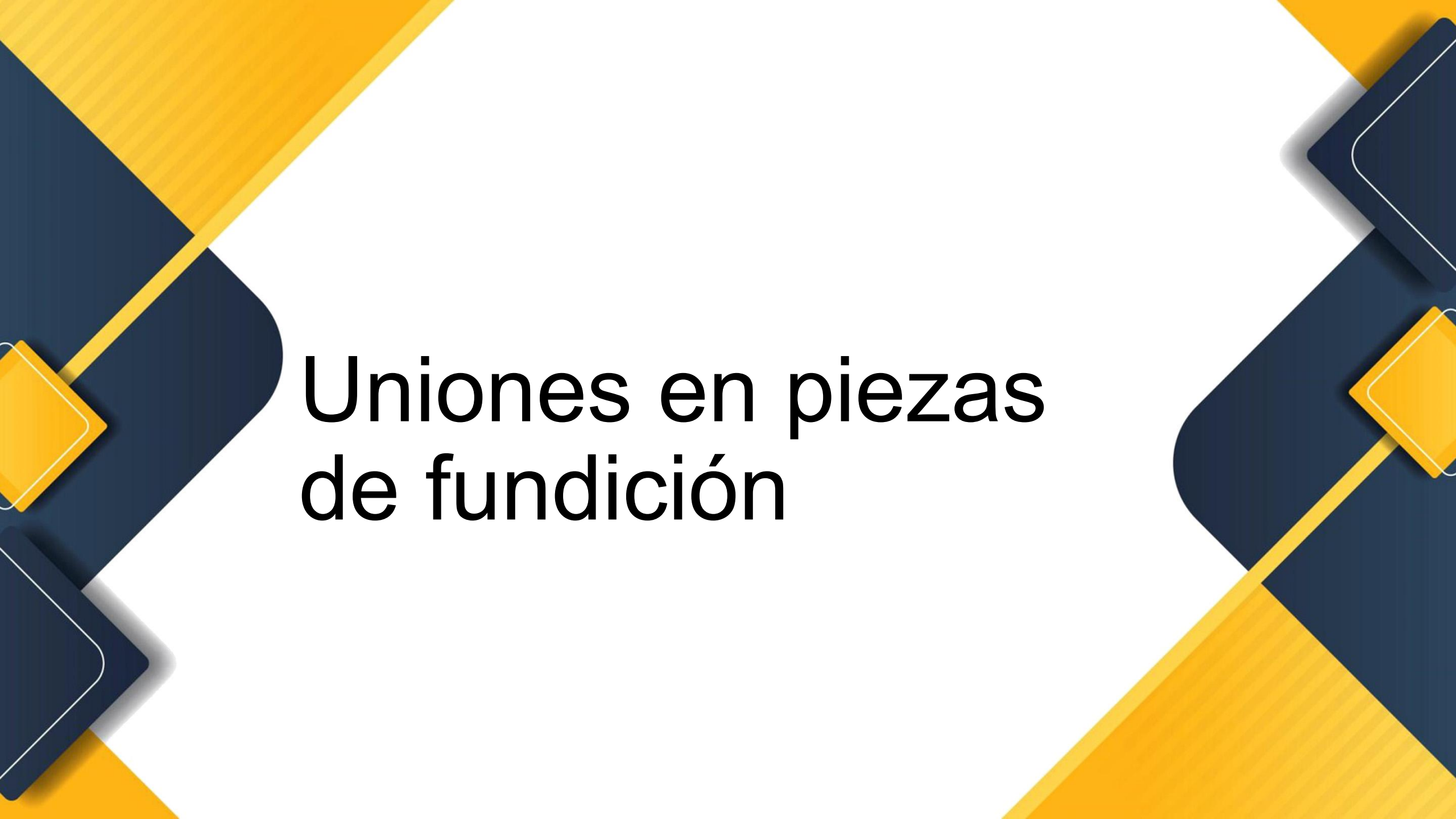


(d)

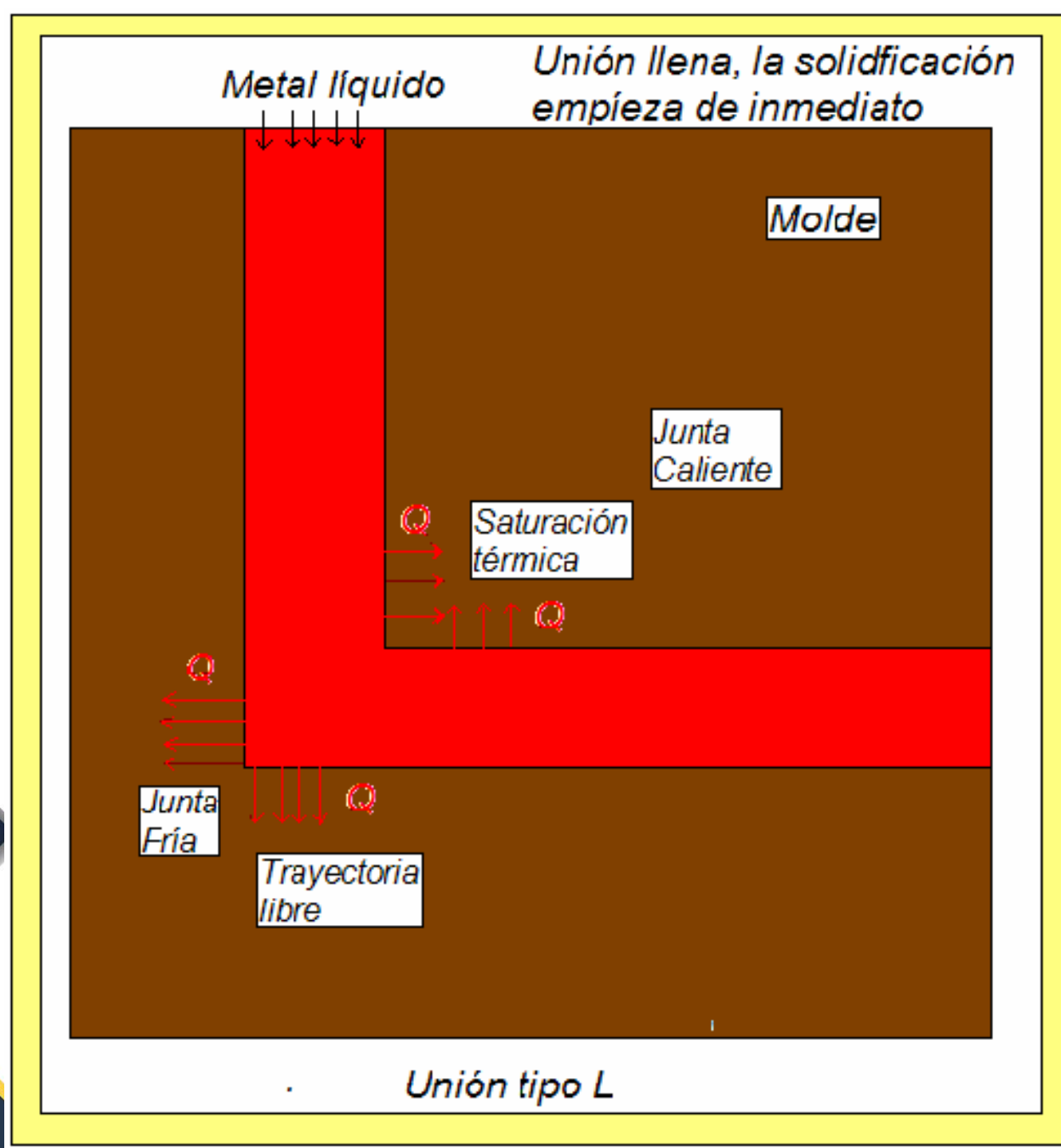


(e)

Methods of controlling shrinkage in an iron cube to reduce riser size. (a) Open-top riser. (b) Open-top riser plus chill. (c) Small open-top riser plus chill. (d) Insulated riser. (e) Insulated riser plus chill

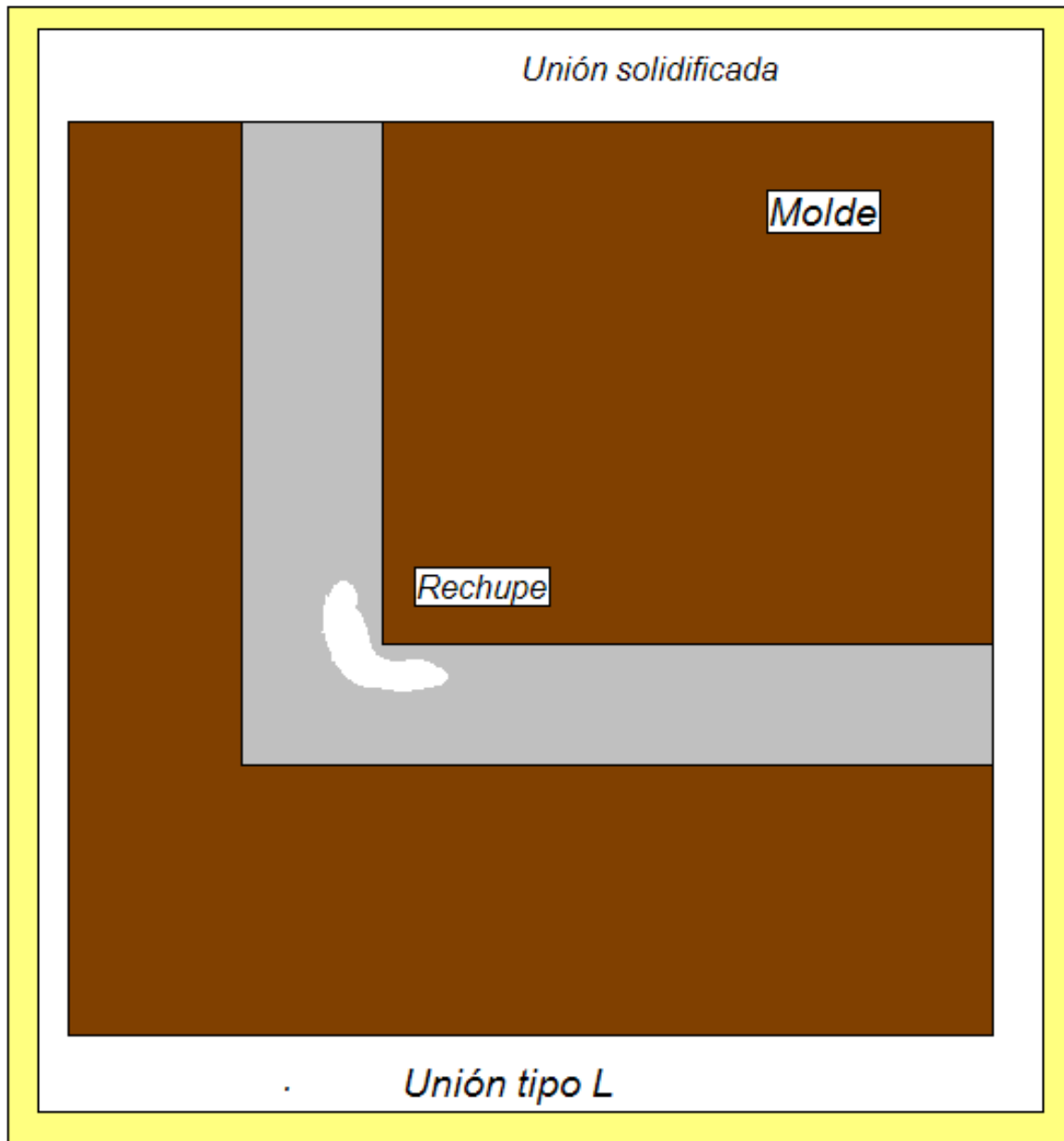


# Uniones en piezas de fundición

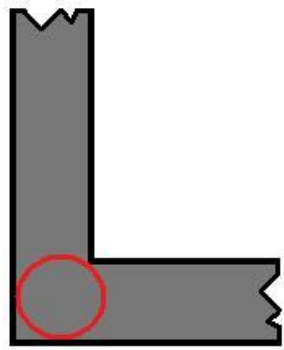


En la junta caliente la disipación de calor es mas lenta que en la junta fría.

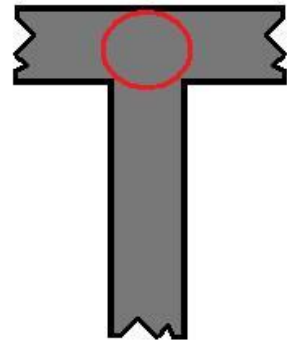
El metal líquido que se encuentra en la junta caliente es el último en solidificar y por tanto es en donde se efectua el rechupe, ya sea disperso o localizado



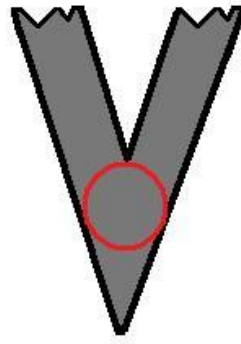
De acuerdo con la posición de la junta caliente, se localiza en donde se efectua el rechupe



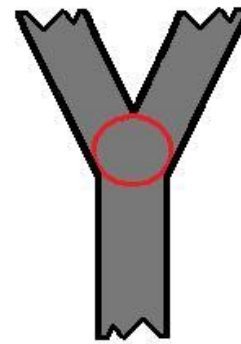
ORIGINAL



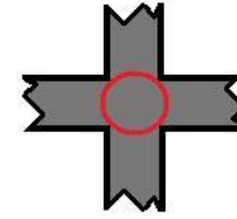
ORIGINAL



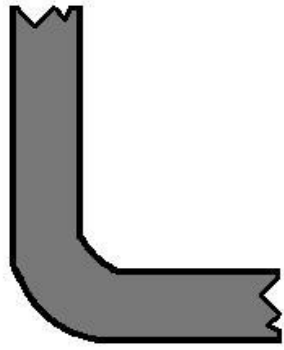
ORIGINAL



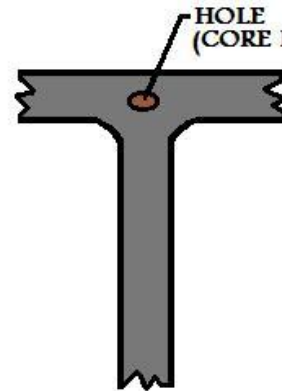
ORIGINAL



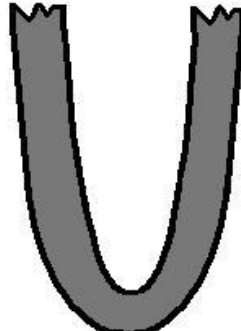
ORIGINAL



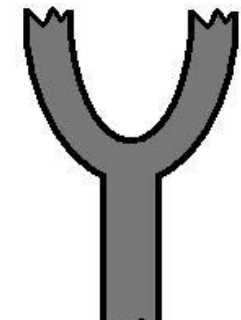
REDESIGN



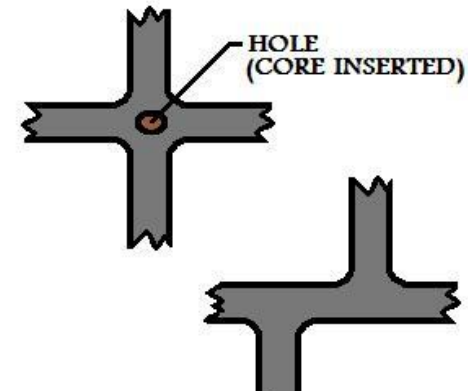
REDESIGN



REDESIGN

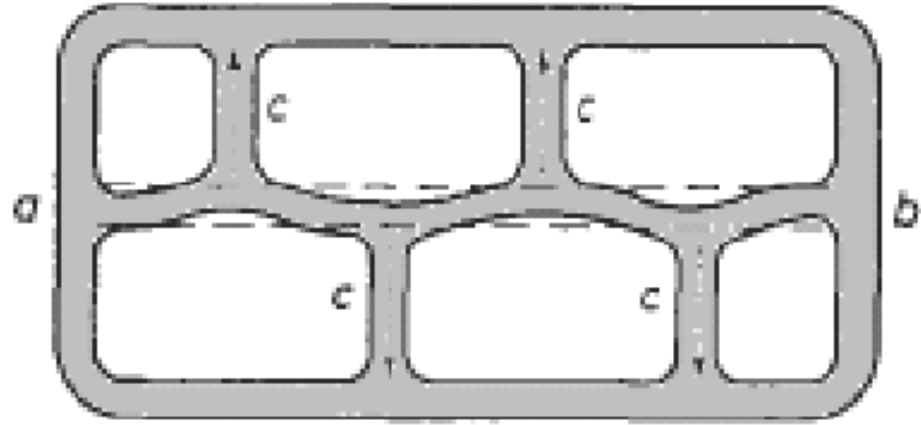


REDESIGN



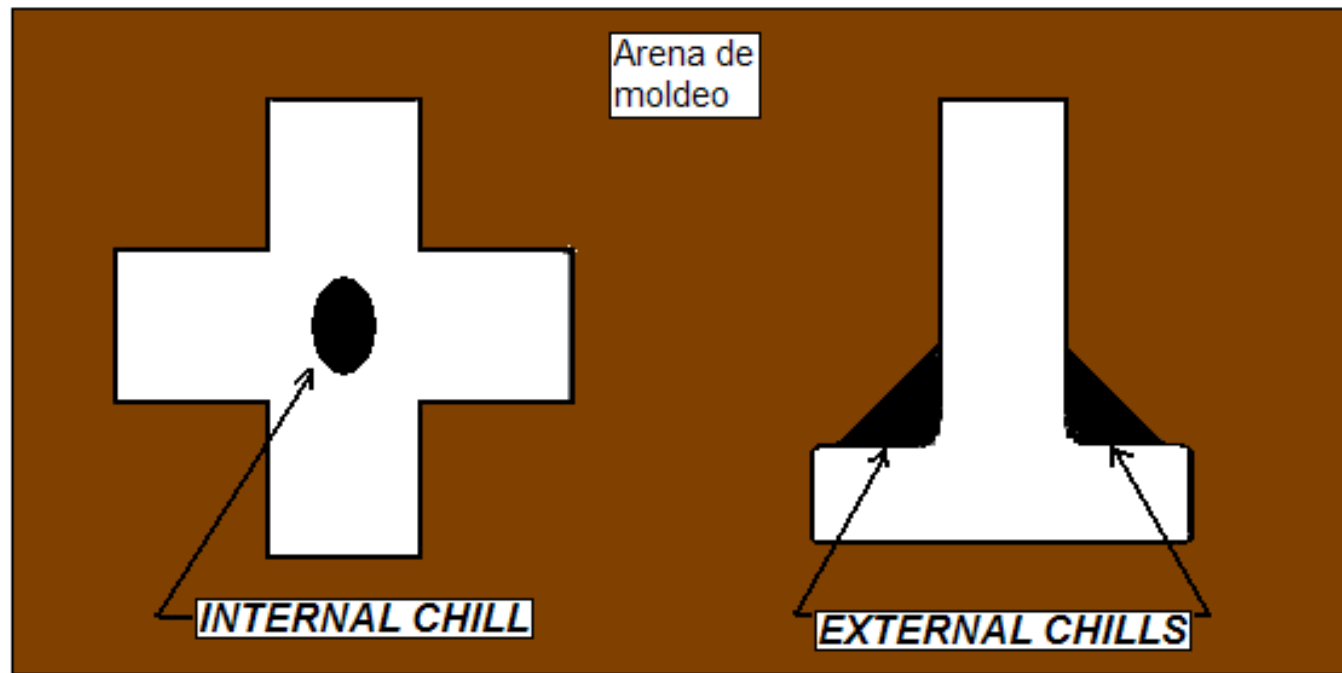
REDESIGN

Algunos tipos de uniones en piezas de fundición. En la fila inferior se presentan posibles soluciones para evitar que en la juntas calientes queden los rechupes. Estos son las uniones más comunes en las piezas



**Figure 16.132** Staggering of ribs prevents the increase of section at junctions, reducing shrinkage problems, and also allows easier deformation to reduce the tendency to crack

Aplicación de los rediseños a una pieza de fundición



Uniones tipo + y tipo T con enfriadores o chills. Interno y externo

En ocasiones, debido a lo complejo de la pieza o a la falta de espacio, no es posible colocar alimentadores.

Cuando sucede esto, se recurre al uso de enfriadores o chills, que pueden ser de 2 tipos:

- Enfriadores internos
- Enfriadores externos

¿Cuál es la forma geométrica adecuada para un alimentador?  
Se puede determinar por la relación volumen/área de transferencia de calor-tiempo de solidificación

TIEMPOS DE ENFRIAMIENTO DE DIFERENTES CUERPOS GEOMÉTRICOS

CUERPO	ESFERA	CILINDRO	CUBO	PRISMA RECT.
VOLUMEN (V)	1000000	1000000	1000000	1000000
ÁREA (A)	48300	55700	60000	70000
V/A	20.6	17.9	16.7	14.28
$(V/A)^2$	424.3	320.4	278.9	203.9
K	0.021	0.021	0.021	0.021
$T_s$	8.9	6.72	5.85	4.28

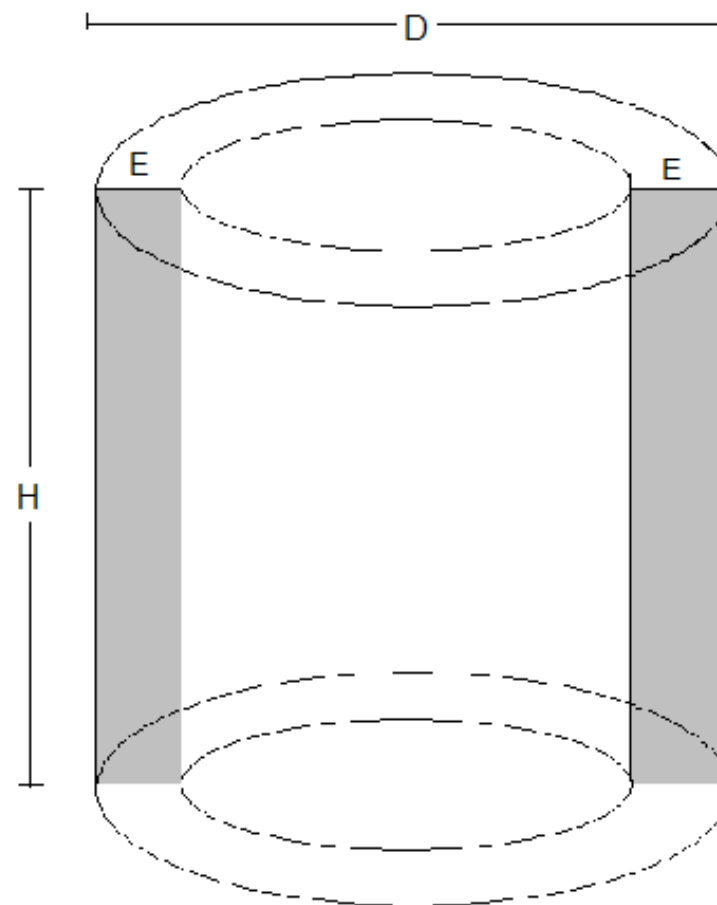
De esta tabla se deduce que la esfera es la forma geométrica adecuada. Lo anterior debido a que, con el mismo volumen, en comparación con los demás cuerpos, tiene el mayor tiempo de solidificación.



# Módulos de solidificación



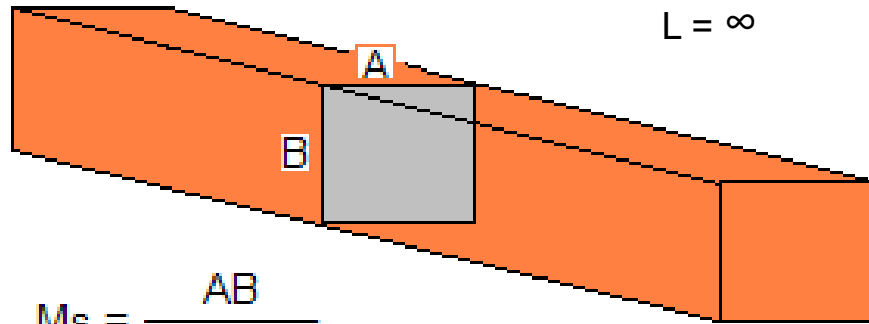
Placa irregular  $M_s = E/2$



Buje (cílindro hueco)  
Donde  $E \ll H$  y  $D$

$$M_s = E/2$$

$$Ms = \frac{\text{área transversal}}{\text{Perímetro de transferencia de calor}}$$

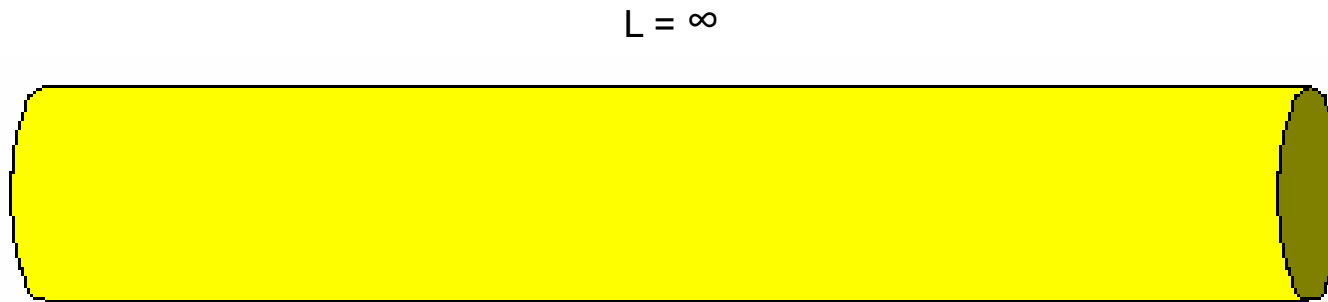


$$Ms = \frac{AB}{2(A+B)}$$

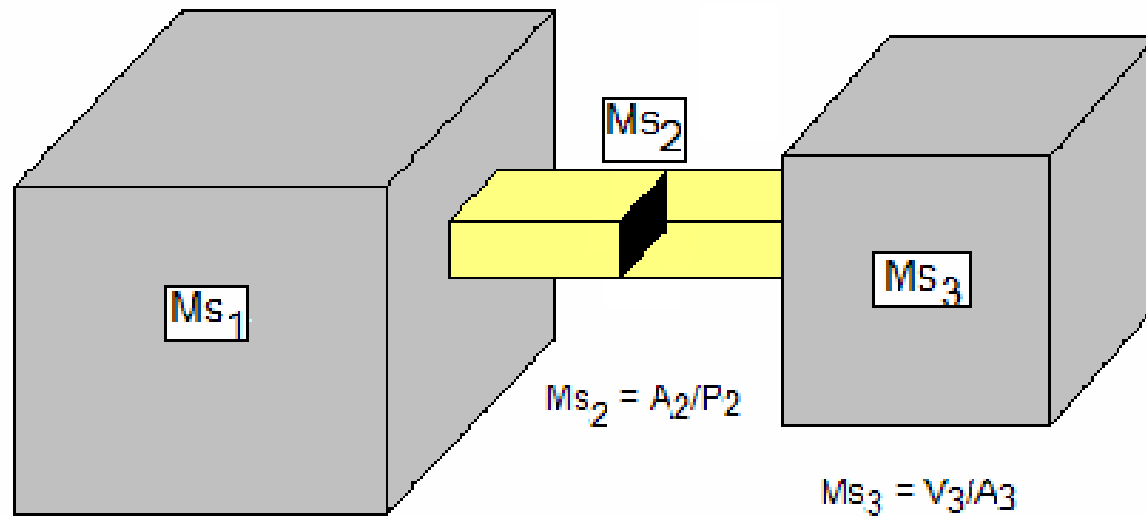
$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$P = \pi D$$

$$Ms = \frac{\frac{\pi}{4} D^2}{\pi D} = \frac{D}{4}$$

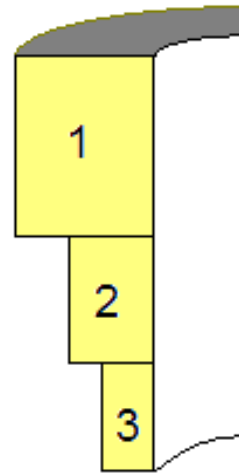
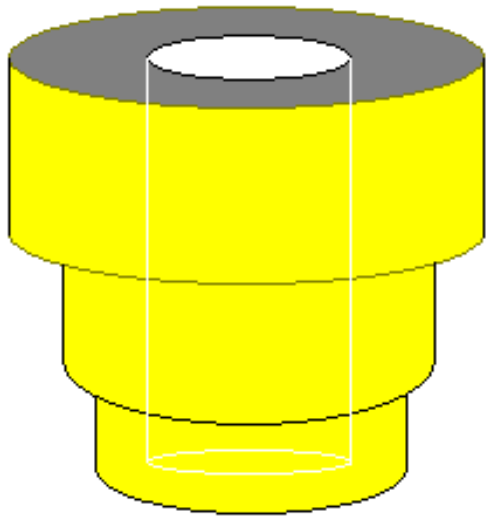


$$Ms = \frac{A}{P}$$



$A_2$  = área transversal  
 $P_2$  = Perímetro de transferencia de calor

## Módulo de solidificación para sólidos semi infinitos



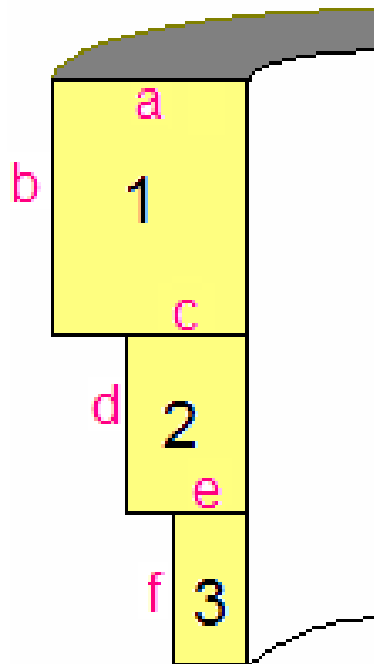
$$Ms_1 = A_1/P_1$$

$$Ms_2 = A_2/P_2$$

$$Ms_3 = A_3/P_3$$

A = Área transversal

P = Perímetro de transferencia de calor



$$Ms_1 = \frac{a b}{a + (a-c) + 2b}$$

$$Ms_2 = \frac{c d}{(c-e) + 2d}$$

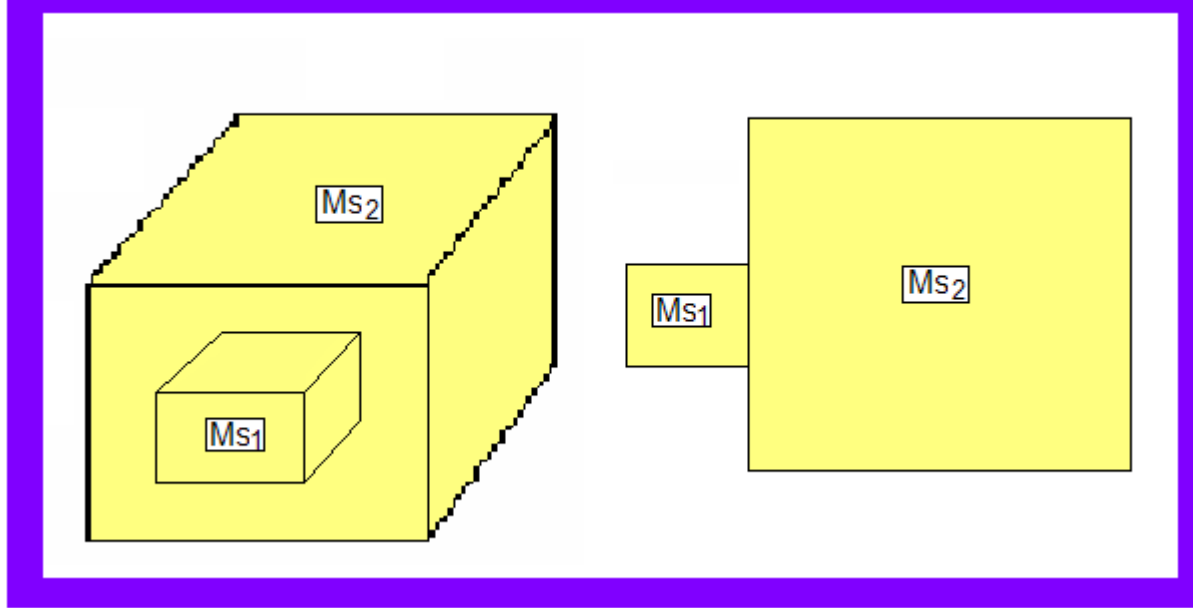
$$Ms_3 = \frac{e f}{e + 2f}$$



# Modulo significativo

## Rutas de solidificación:

- Convergentes
  - Divergentes
- 



La figura presenta dos perspectivas de la misma pieza: 2 cubos unidos, uno pequeño y uno grande.

El pequeño tiene un módulo de solidificación  $Ms_1$

El cubo grande, a su vez, tiene un módulo de solidificación  $Ms_2$ .  $Ms_2 > Ms_1$

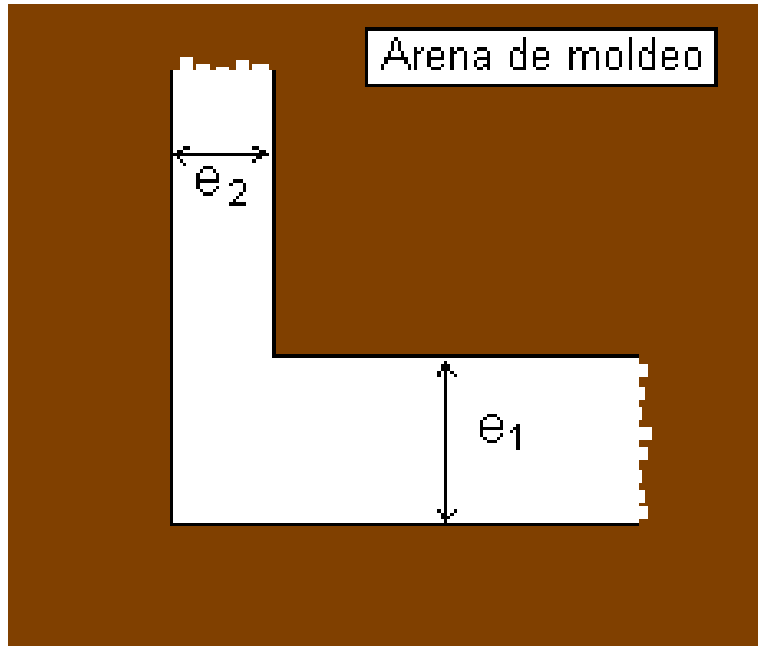
Si se analiza la solidificación, primero solidifica la pieza pequeña efectuándose el rechazo respectivo. Como la pieza grande contiene metal líquido todavía, ésta manda metal líquido hacia el rechazo de la pieza pequeña.

Se establece que  $Ms_1 < Ms_2$  y por tanto se establece una ruta de solidificación, ésta es  $Ms_1$   $Ms_2$ . La ruta se establece desde el módulo más pequeño hacia el más grande

$Ms_2$  es el módulo significativo, es decir es el módulo de mayor valor y es donde se va a colocar el alimentador para los dos cubos.

# Relaciones de espesores en uniones

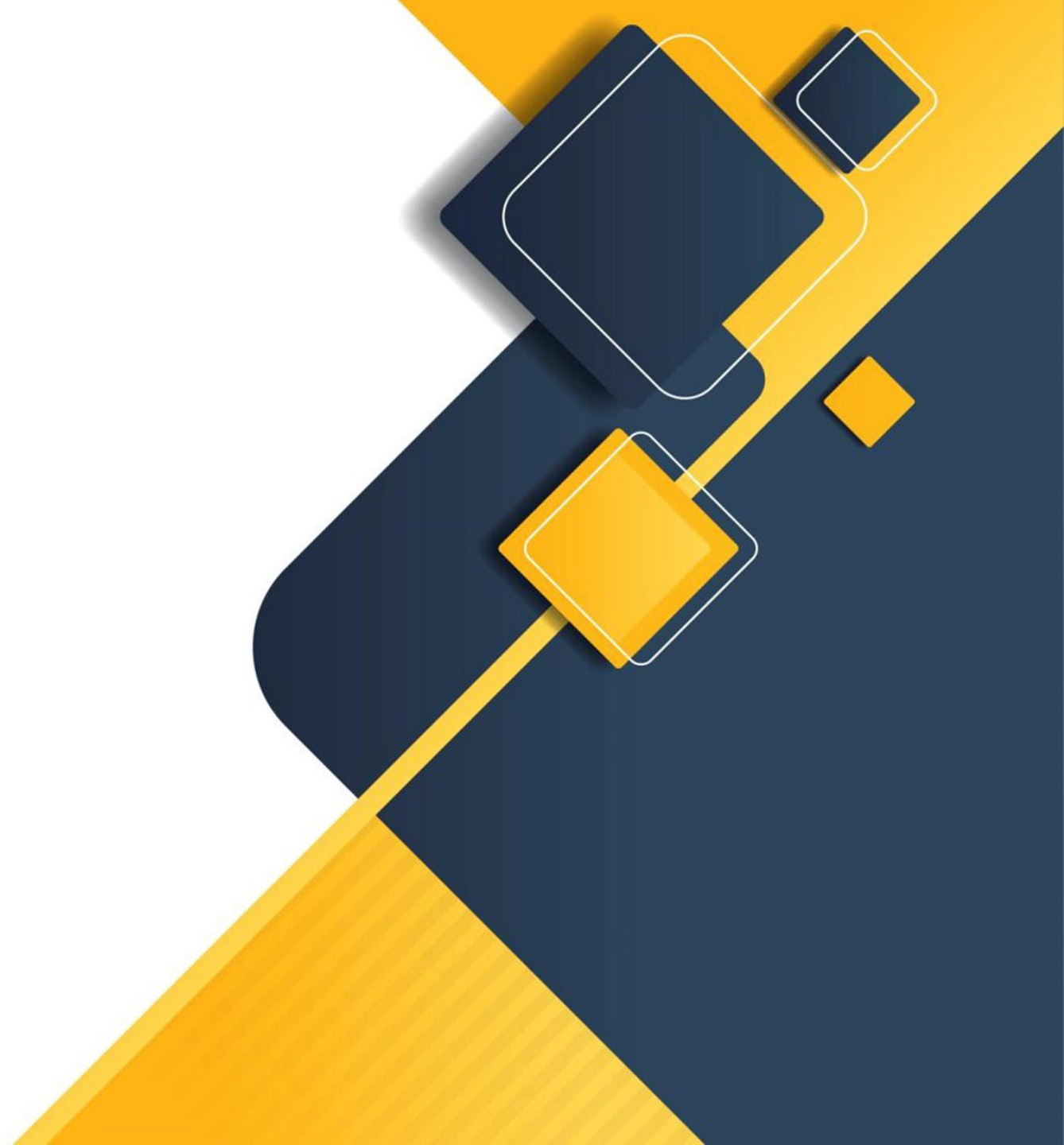
# Unión L



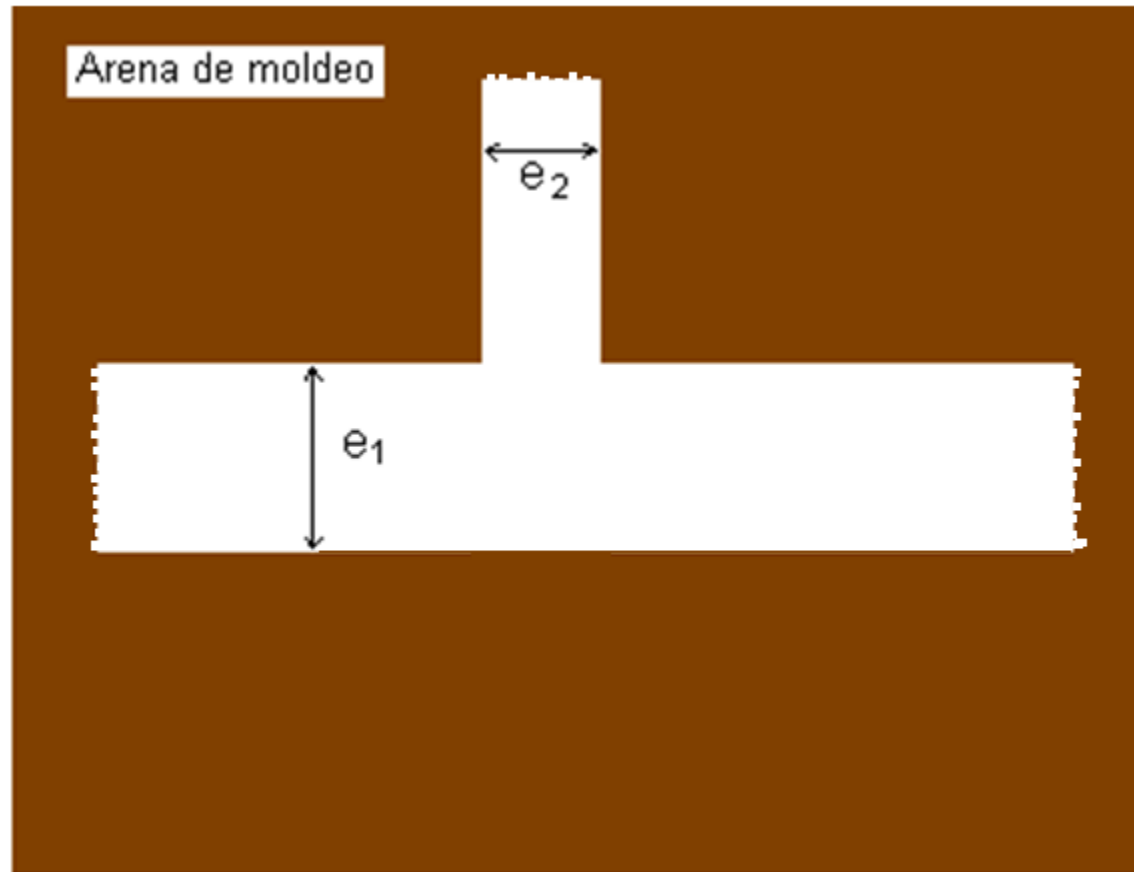
$e_2/e_1 < 0.75$  Aleta de enfriamiento

$e_2/e_1 = 0.75$  Punto neutro

$e_2/e_1 = 1$  Punto caliente

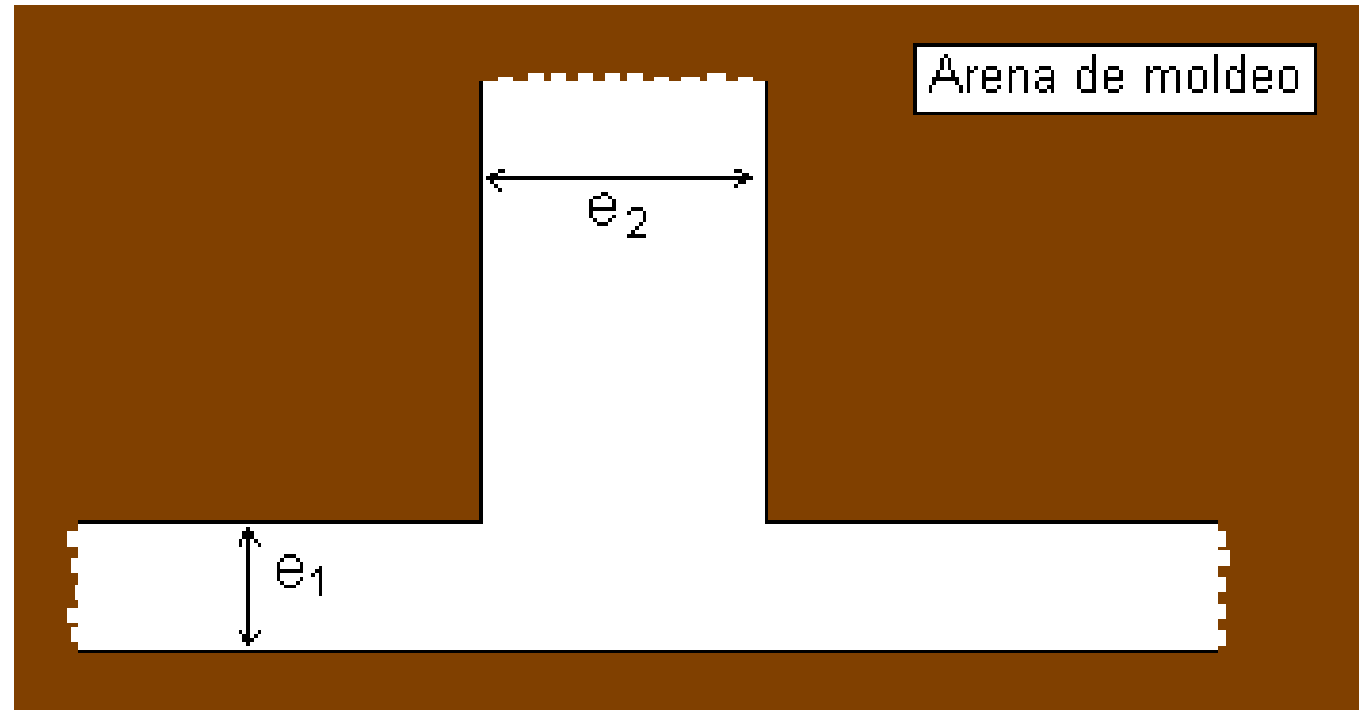


# Unión T invertida



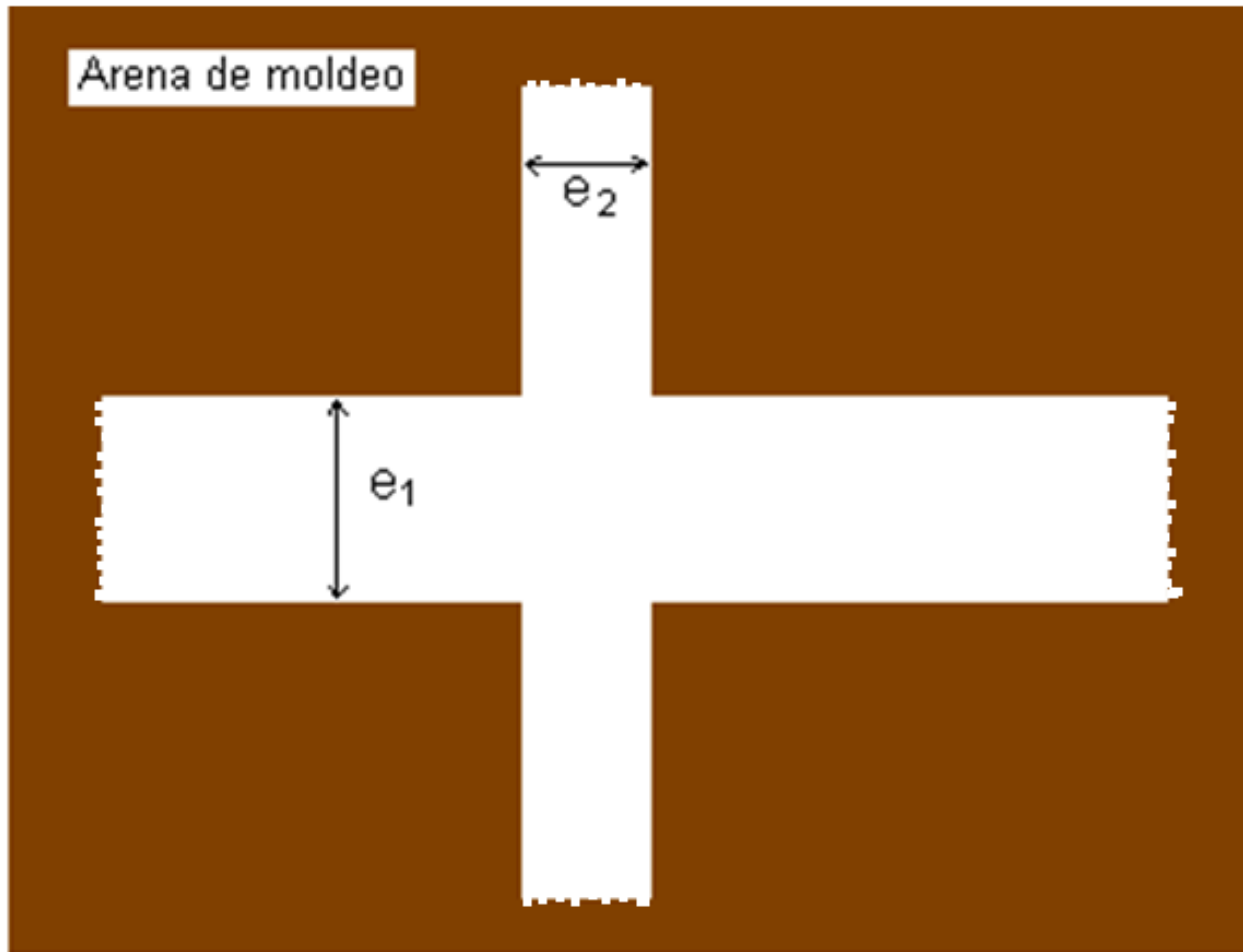
$e_2/e_1 < 0.50$  Aleta de enfriamiento  
 $e_2/e_1 = 0.50$  Punto neutro  
 $e_2/e_1 = 1$  Punto caliente

# Unión T invertida



$e_2/e_1 < 0.65$  Aleta de enfriamiento  
 $e_2/e_1 = 0.65$  Punto neutro  
 $e_2/e_1 = 1$  Punto caliente

## Unión +

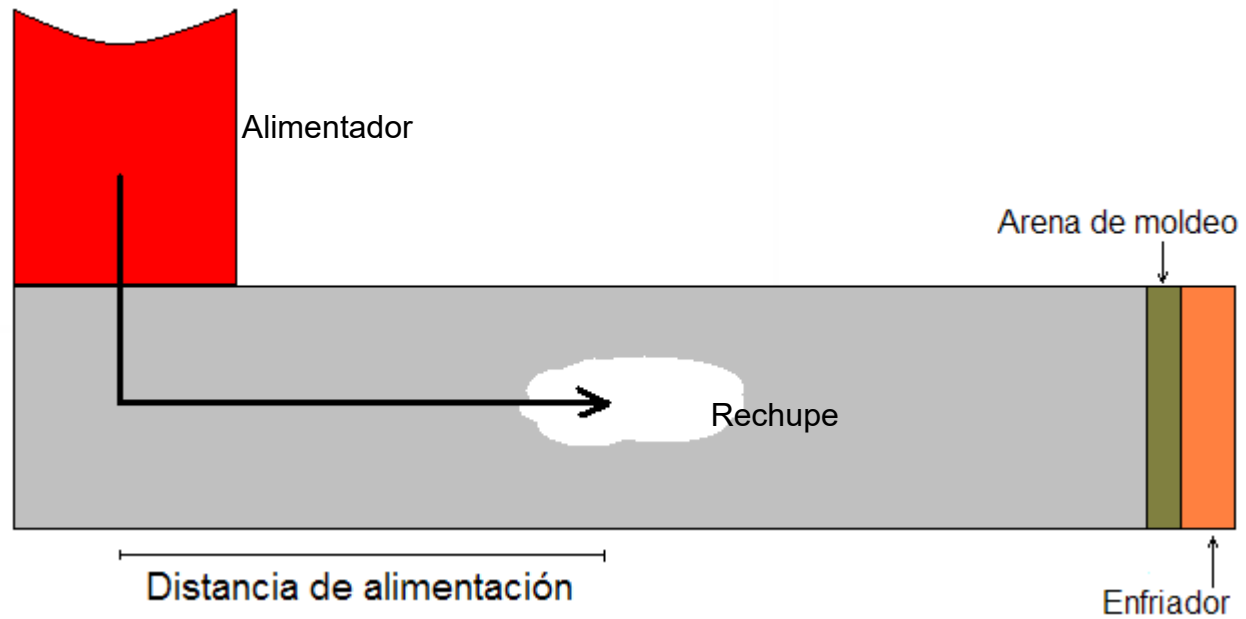
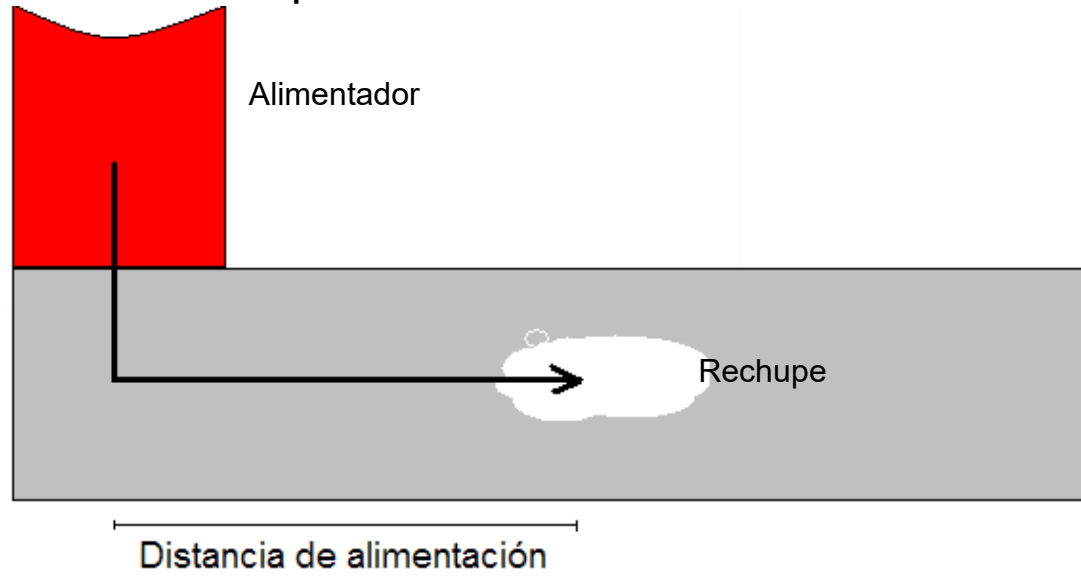


$e_2/e_1 < 0.50$  Aleta de enfriamiento  
 $e_2/e_1 = 0.50$  Punto neutro  
 $e_2/e_1 = 1$  Punto caliente



## Distancia de alimentación

Es la distancia a la cual el alimentador manda metal líquido para subsanar los rechupes



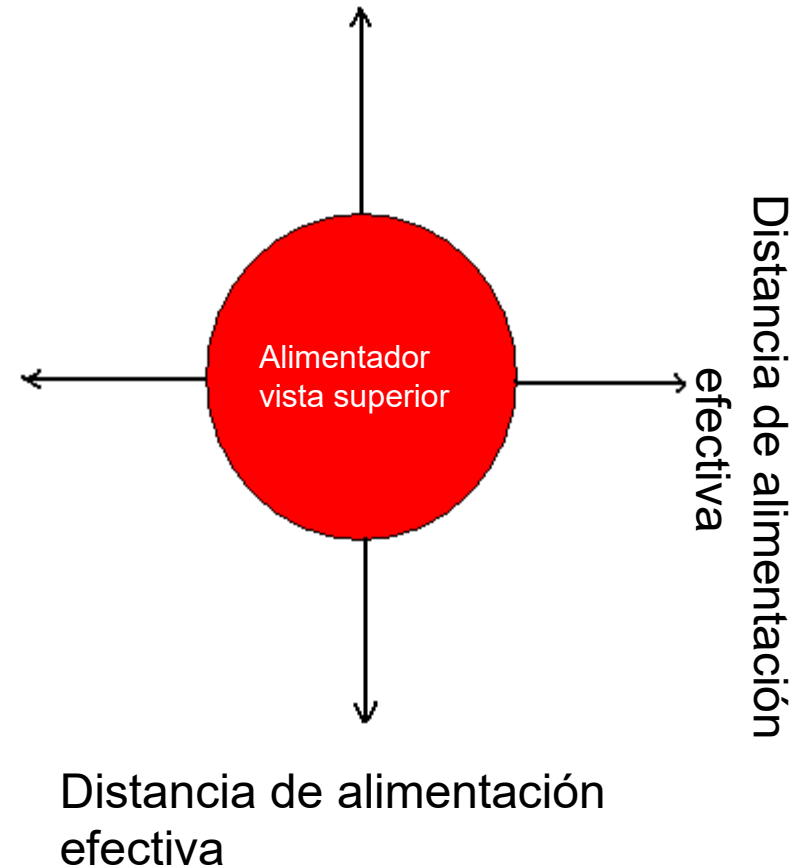
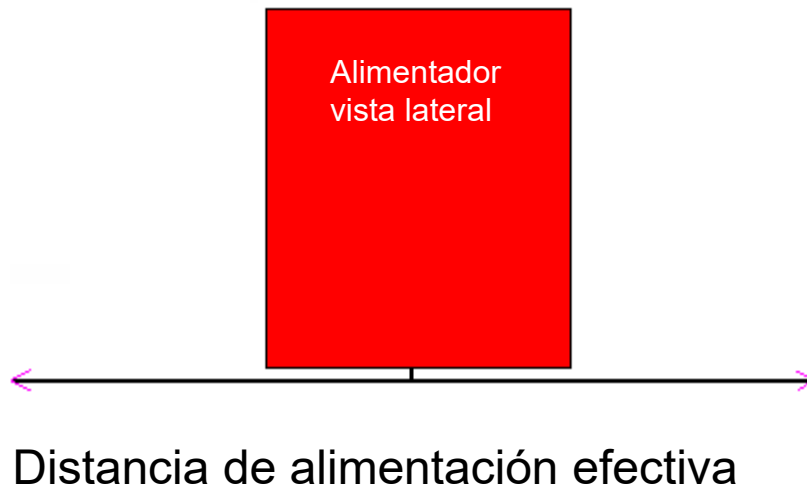
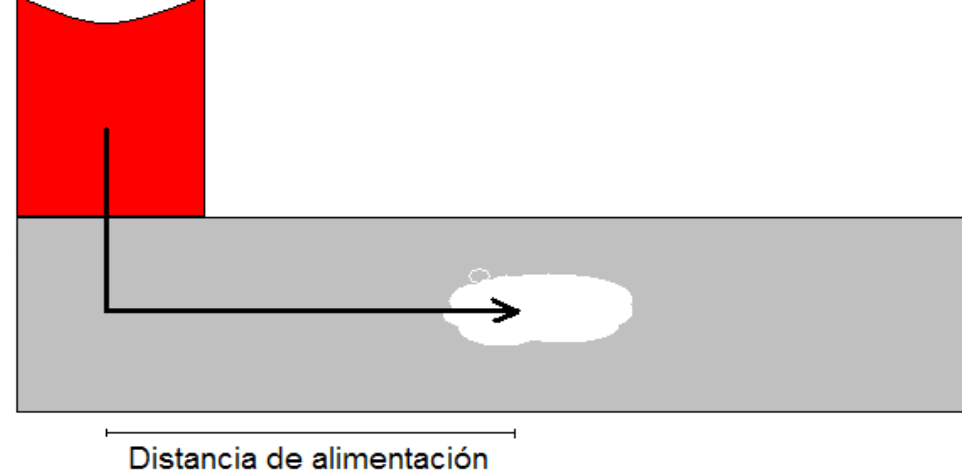
La distancia de alimentación esta en función del tipo de aleación, es decir

Aleación de rango corto de solidificación (ARCS)

Aleación de rango largo de solidificación (ARLS)

La distancia de alimentación es mayor para las ARCS debido a que su solidificación presenta “frentes planos”. En cambio las ARLS presentan, en su solidificación, frentes rugosos que impiden el flujo fácil. Para “aumentar” las distancias de alimentación se pueden utilizar los enfriadores externos

En la literatura se encuentran datos de distancia de alimentación (D.A.) Esta distancia se toma hacia el lado derecha o hacia el lado izquierdo y no hacia ambos lados. Por tanto se debe considerar una distancia de alimentación efectiva  $D.A_{ef} = 2 D.A.$  como se muestra en las figuras de abajo




# Cálculo de alimentadores

Otras metodologías y consideraciones

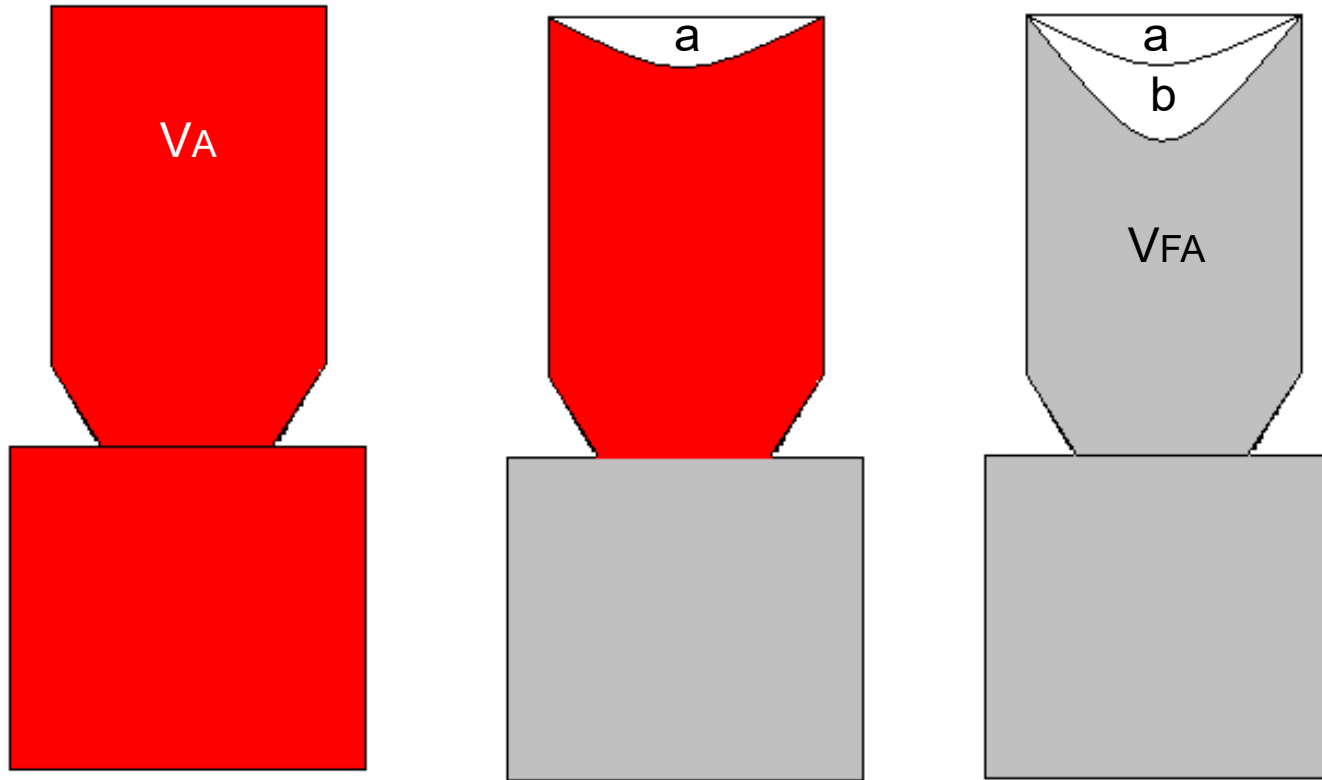


# Metodología para el cálculo de Alimentadores

- Buscar posición de la pieza durante el moldeo por medio de la línea de partición (L.P.)
  - Localizar los tipos de uniones
  - Aplicación del criterio de uniones
  - Calcular los módulos de solidificación
  - Localizar las rutas de solidificación
  - Identificar a los módulos significativos de solidificación
  - Calcular el número de alimentadores en función de la distancia de alimentación
  - Aplicar el método de cálculo de alimentadores
- 

Cálculo de alimentadores, según Adams & Taylor.

Adams & Taylor modificaron el criterio de Chvorinov, considerando que el tiempo total de solidificación de la pieza es igual al tiempo de solidificación del alimentador o sea  $t_{SP} = t_{SA}$ . Esto siempre y cuando se considere a un nuevo parámetro  $V_{FA}$  (volumen final del alimentador).



a = contracción debida a la pieza

b = contracción debida al alimentador

a + b = contracción total

$$V_{FA} = V_A - \beta(V_A + V_P)$$

$$\beta = \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_S}$$

$V_{AF}$  = Volumen final del alimentador

$V_A$  = Volumen del alimentador

$V_P$  = Volumen de la pieza

$\beta$  = Contracción líquido – líquido +  
contracción por solidificación

*Ahora*

$$M_{SA} = \frac{V_{FA}}{A_A} = k_A \sqrt{t_{SA}}$$

Por tanto

$$t_{SA} = \left( \frac{V_{FA}}{A_A} \frac{1}{k_A} \right)^2$$

Y por consecuencia

$$t_{SP} = \left( \frac{V_P}{A_P} \frac{1}{k_P} \right)^2$$

Segun Adams & Taylor

$$t_{SA} = t_{SP}$$

por tanto

$$\left( \frac{V_{FA}}{A_A} \frac{1}{k_A} \right)^2 = \left( \frac{V_P}{A_P} \frac{1}{k_P} \right)^2$$

$$\frac{V_{FA}}{A_A} \frac{1}{k_A} = \frac{V_P}{A_P} \frac{1}{k_P}$$

$$\frac{V_{FA}}{A_A} = \frac{V_P}{A_P} \frac{k_A}{k_P}$$

sustituyendo  $V_{FA} = V_A - \beta(V_A + V_P)$

$$\frac{V_A - \beta(V_A + V_P)}{A_A} = \frac{V_P}{A_P} \frac{k_A}{k_P}$$

$$\frac{V_A - \beta(V_A + V_P)}{A_A} = \frac{V_P k_A}{A_P k_P}$$

$$\frac{V_A}{A_A} - \frac{\beta V_A}{A_A} - \frac{\beta V_P}{A_A} = \frac{V_P k_A}{A_P k_P}$$

$$\frac{V_A}{A_A} (1 - \beta) - \frac{\beta V_P}{A_A} = \frac{V_P k_A}{A_P k_P}$$

$$\frac{V_A}{A_A} = \frac{\frac{V_P k_A}{A_P k_P} + \frac{\beta V_P}{A_A}}{(1 - \beta)}$$

$V_P$  = Volumen total de la pieza o de parte de la pieza o de la ruta de solidificación

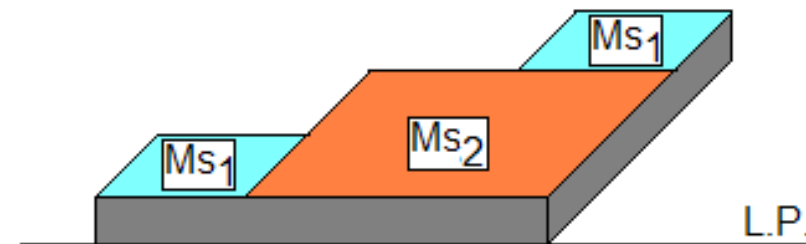
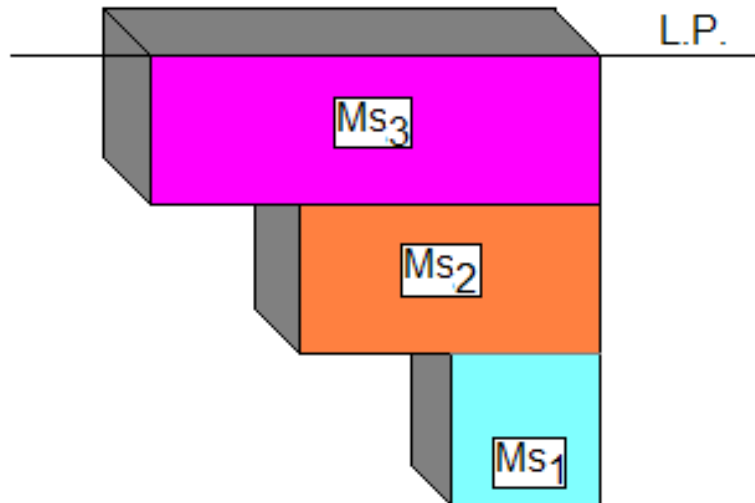
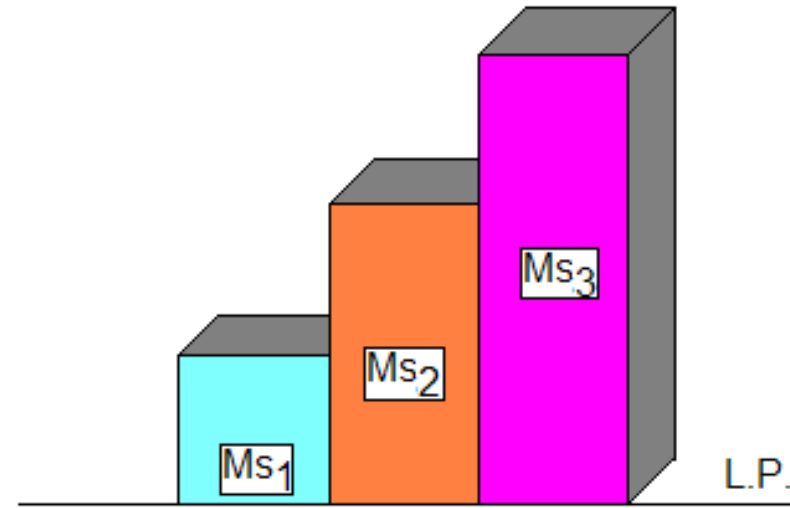
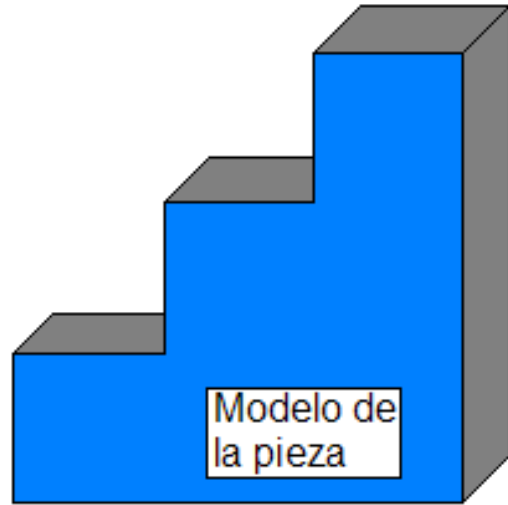
$A_A$  = área de transferencia de calor del alimentador (en función de D)

En forma de módulos

$$M_{SA} = \frac{M_{SP} \left( \frac{k_A}{k_P} \right) + \frac{\beta V_P}{A_A}}{(1 - \beta)}$$

Esta última ecuación se resuelve para D (diámetro del alimentador) y de aquí para H (altura del alimentador)

División de una pieza en módulos de solidificación, de acuerdo con su posición durante el moldeo.



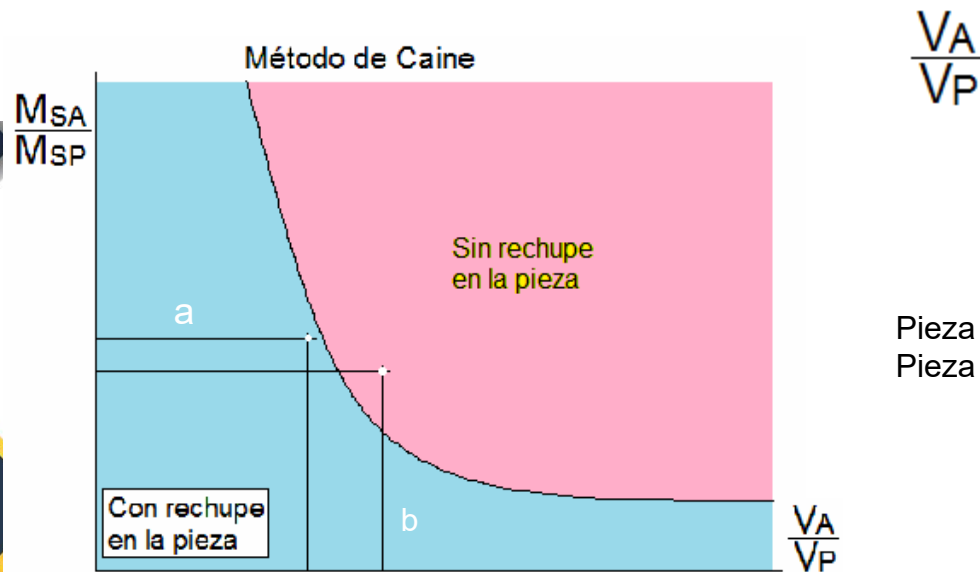
## Método de Caine



$$\frac{M_{SA}}{M_{SP}} = \frac{a}{\frac{V_A}{V_P} - b} + c$$

$a, b, c$  son constantes

Ejemplo: si  $H/D = 1$



Pieza a) con rechupe  
Pieza b) sin rechupe

$$\frac{D}{6} = \frac{a}{\frac{\pi D^3}{4} - b} + c$$

Se resuelve para  $D$  y entonces para  $H$

Método de Caine.

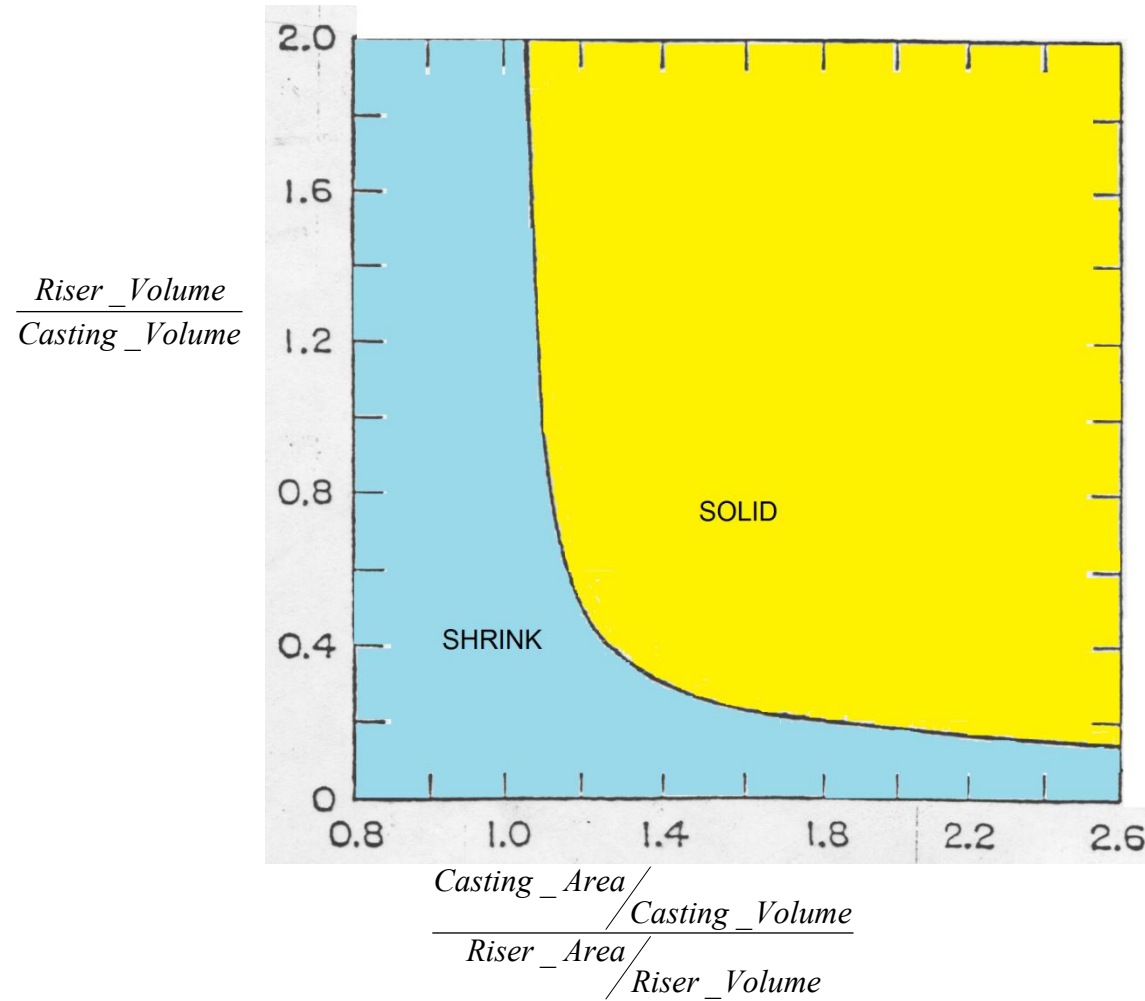
Experimental

Aleación	a	b	c
Steel	0.10	0.03	1.00
Aluminium	0.10	0.06	1.08
Cast iron, Brass	0.04	0.017	1.00
Grey cast iron	0.33	0.030	1.00
Aluminium bronze	0.24	0.017	1.00
Silicon bronze	0.24	0.017	1.00

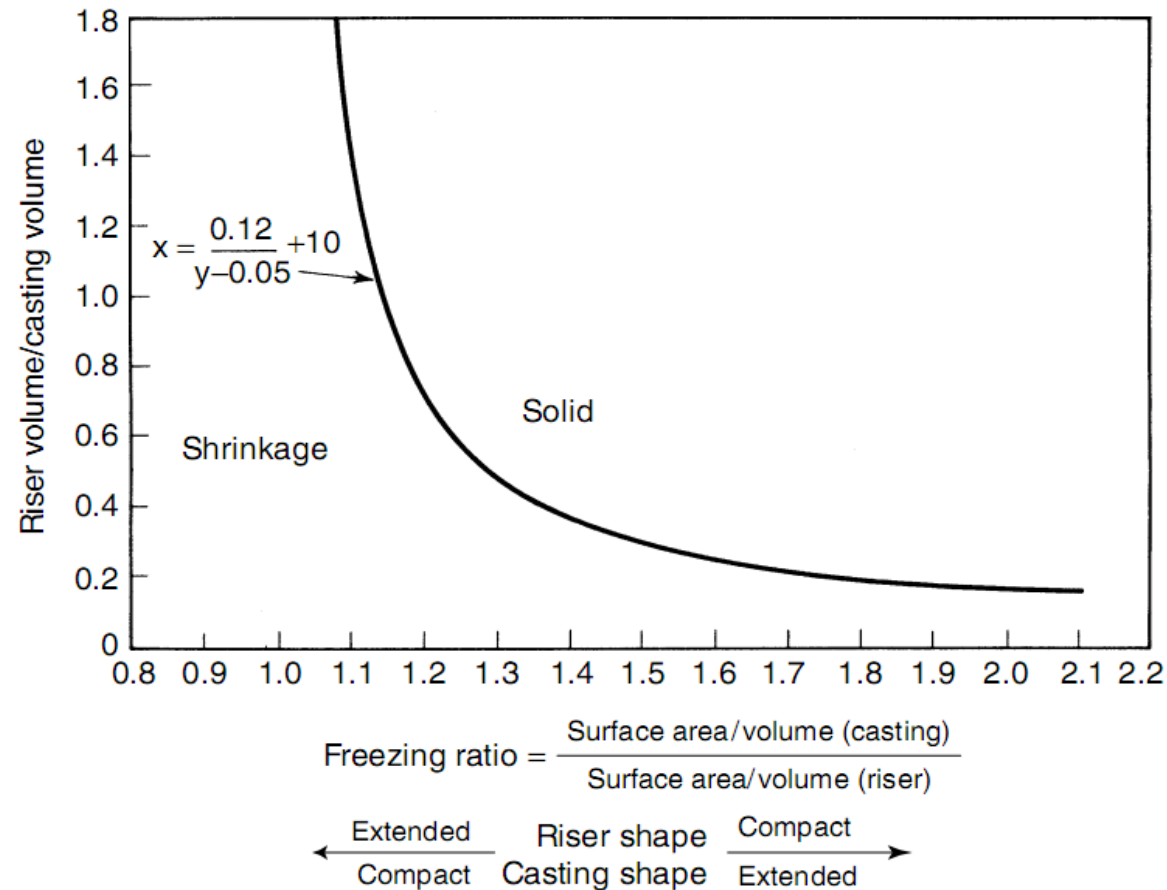
Valores de a, b, c para diferentes aleaciones

# Riser design: Caine's Method

Relative riser and casting geometry to obtain sound steel castings



# Riser design: Caine's Method



**Figure 3.12** Caine's curve for minimum feeder head volume, based on relative freezing rates of casting and head, or freezing ratio (after Reference 41) Basic risering equation:  $x = a/(y - b) + c$ , where  $x$  = freezing ratio,  $y$  = riser volume/casting volume,  $a$  = freezing characteristics constant,  $b$  = liquid–solid solidification contraction,  $c$  = relative freezing rate of riser and casting (courtesy of American Foundrymen's Society)