

2.1. La pràctica del colament

El colament consisteix a abocar (colar) el metall líquid en un motlle (emmotllament), on se solidifica. Per a molts metalls, la seva història comença en una operació de fusió, amb la qual el metall es pot extreure dels seus minerals (Fe, Cu, Zn, Sn...). Els metalls que fonen a temperatures properes o inferiors a 1.000°C ja es colaven en temps prehistòrics (Au, Ag, Cu, bronze...). El cas del ferro és diferent, ja que fins al segle XVIII no va ser possible construir forns que arribessin a la seva elevada temperatura de fusió de 1.500°C. Tot i això, la humanitat ja utilitzava el ferro en temps antics extraient-lo del mineral per mitjans mecànics (la farga catalana). Per tant, tot i que el ferro ha estat el metall més utilitzat per la humanitat durant mil·lennis, no ha estat fins als dos darrers segles que s'ha pogut colar.

En aquest capítol, descriurem els aspectes més "externs", més visibles, de la pràctica del colament, que fan referència a la peça sencera: com es fabrica, quant triga a solidificar-se i la contracció de la peça. Aquests aspectes són importants en la pràctica diària d'una foneria, ja que estan relacionats amb la productivitat i les toleràncies dimensionals. És l'aspecte extern del colament, que ens parla poc o gens de la qualitat del material.

2.1.1. Les tècniques de colament

D'una banda se solen agrupar les tècniques destinades a fabricar preformes que seran deformades en etapes posteriors:

- a) colament en lingotera: s'obtenen lingots
- b) colada contínua: s'obtenen perfils llargs

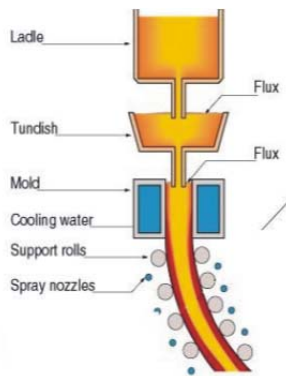


Figura 2.1. Esquema d'una colada contínua

De l'altra, hi ha un nombre enorme de tècniques destinades a colar peces amb la forma final desitjada. En general són les tècniques que s'anomenen d'*emmotllament*, ja que el material s'aboca dins d'un motlle. Entre moltes altres podem esmentar:

- a) Emmotllament en sorra: El motlle serveix només una vegada (Figura 2.2).

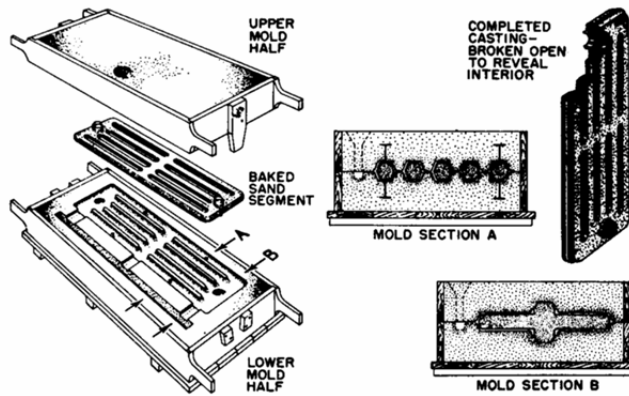


Figura 2.2. Esquema del processament per emmotllament en sorra d'un radiador

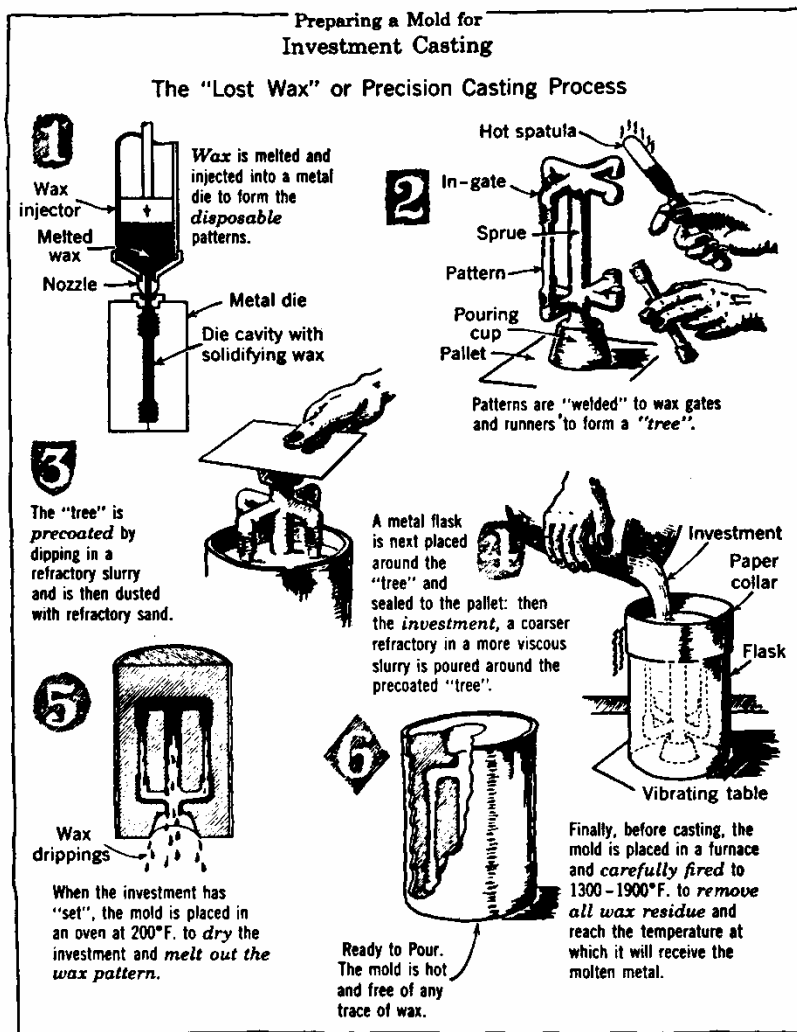


Figura 2.3. Preparació d'un motlle per a la tècnica d'emmotllament a la cera perduda

b) Emmotllament a la cera perduda: És un emmotllament que permet fabricar peces de geometria complexa. El motlle serveix, també, només una vegada (Figura 2.3).

c) Emmotllament a pressió: per a peces petites. La productivitat és molt elevada. El motlle és metàl·lic i està refrigerat. Només serveix per a metalls de baix punt de fusió, com ara l'alumini i el magnesi (Figura 2.4).

d) Emmotllament permanent. A diferència de l'emmotllament a pressió, el metall líquid entra per gravetat. S'utilitza per a peces grans.

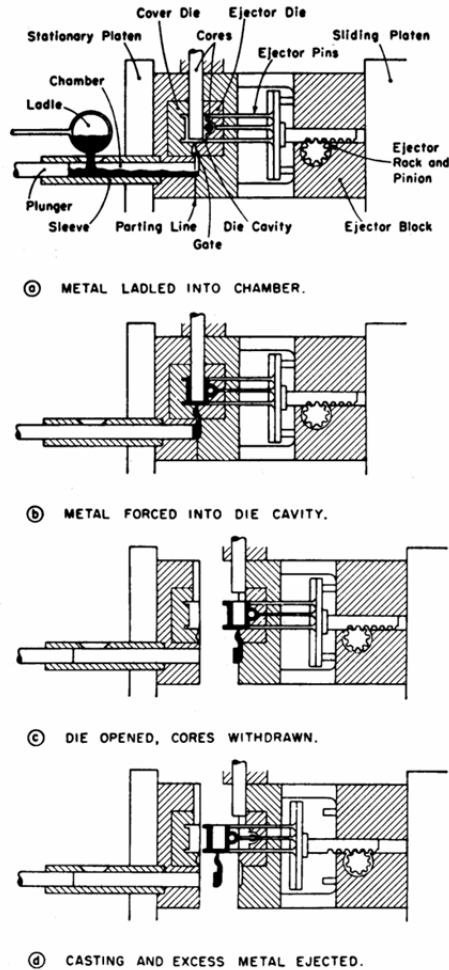


Figura 2.4. Emmotllament a pressió d'una peça petita

2.1.2. Emplenament del motlle: colabilitat

En el moment de colar el líquid, la primera pregunta que ens podem fer és si arribarà a emplenar completament totes les cavitats del motlle. Com que el motlle és fred, es podria donar el cas que el metall se solidifiqués prematurament i obstruís, així, el pas del líquid. La seqüència de les figures següents il·lustra aquesta situació:

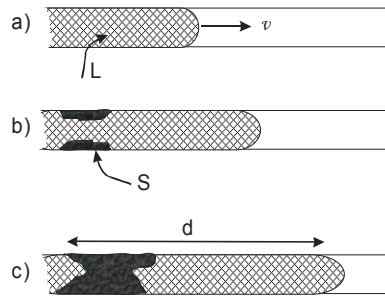


Figura 2.5. Obstrucció del pas del líquid durant la solidificació en un motlle: a) entrada del líquid al motlle; b) el líquid comença a solidificar-se a l'entrada, que és el punt on ha estat més temps en contacte amb el motlle fred; c) el pas del líquid ha quedat obstruït.

La distància D recorreguda dins del canal és una mesura de la colabilitat. Es pot entendre fàcilment que, per a un motlle determinat, la colabilitat s'incrementa quan:

- la temperatura del líquid és més elevada
- el líquid entra més ràpidament (per exemple, sota pressió)

Curiosament, en la majoria de situacions pràctiques la colabilitat no depèn de la viscositat. En la Figura 2.6 mostrem l'esquema d'un assaig típic de colabilitat.

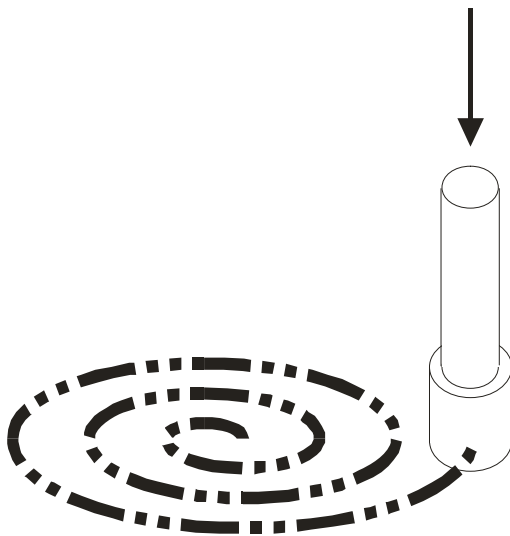


Figura 2.6. Esquema d'un assaig ideat per determinar la colabilitat d'un metall en unes certes condicions.

2.1.3. Dissipació tèrmica

El pas de líquid a sòlid comporta una disminució d'energia. Per tant, el procés requereix que la calor despresada es pugui extreure. Si no, la solidificació s'atura. La quantitat de calor despresada prové de dos fenòmens:

a) el refredament del líquid:

$$Q_R = Mc_L (T_L - T_F) \tag{1}$$

on M és la massa del líquid, c_L és la calor específica del líquid, T_L és la temperatura d'aquest en el moment de colar i T_F , la temperatura de solidificació. La diferència $T_L - T_F$ s'anomena el *sobreescalfament*.

b) la calor de solidificació:

$$Q_F = M \cdot l \quad (2)$$

on l és la calor latent de solidificació.

La calor s'extreu a través del gruix de metall que ja s'ha solidificat i de les parets del motlle. En general, es crearà un perfil de temperatura com el de la Figura 2.7

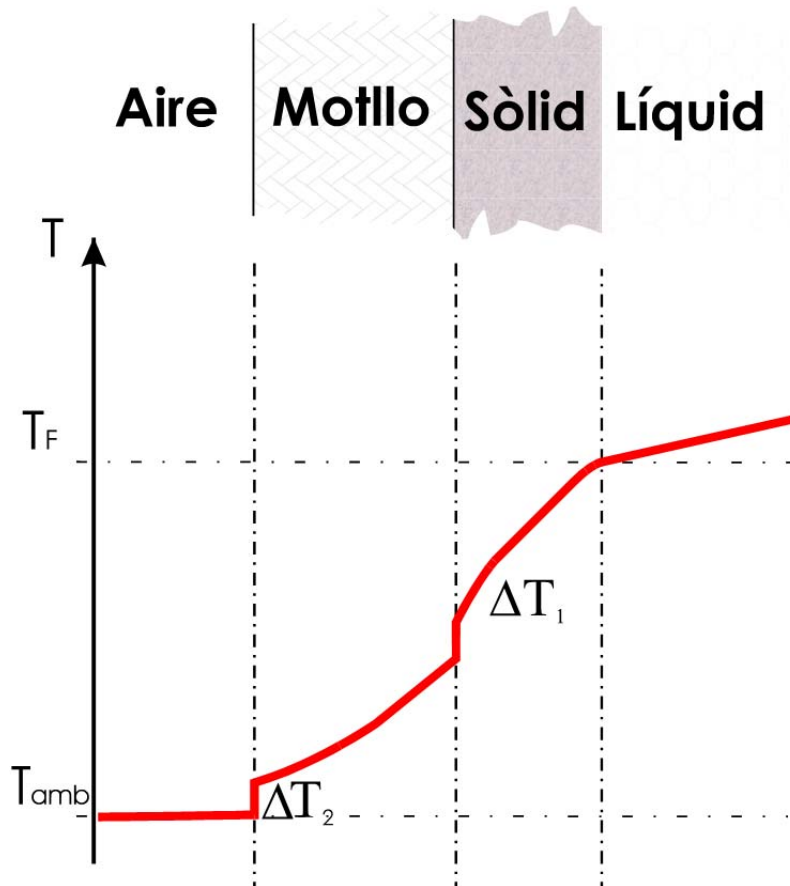


Figura 2.7 Perfil de temperatura durant la solidificació d'un metall

Els salts de temperatura entre el motlle i el sòlid, ΔT_1 , i entre el motlle i l'ambient, ΔT_2 , són deguts a les resistències de contacte. Per exemple, el sòlid en general no farà un bon contacte tèrmic amb el motlle i ΔT_1 limitarà la capacitat d'extracció de la calor.

2.1.4. Volum solidificat i temps de solidificació

Tot i que el càlcul del temps de solidificació és, en general, complex, hi ha dos casos extrems en els quals es pot arribar a expressions senzilles que s'acosten a la realitat.

a) *Dissipació dominada per la resistència motlle-sòlid.* És un cas vàlid per a motlles metàl·lics (bons conductors de la calor). El salt tèrmic es produirà, principalment, a la superfície interna del motlle (ΔT_1). Considerem, a més a més, que colem el líquid sense sobreescalfament ($T_L \approx T_F$).

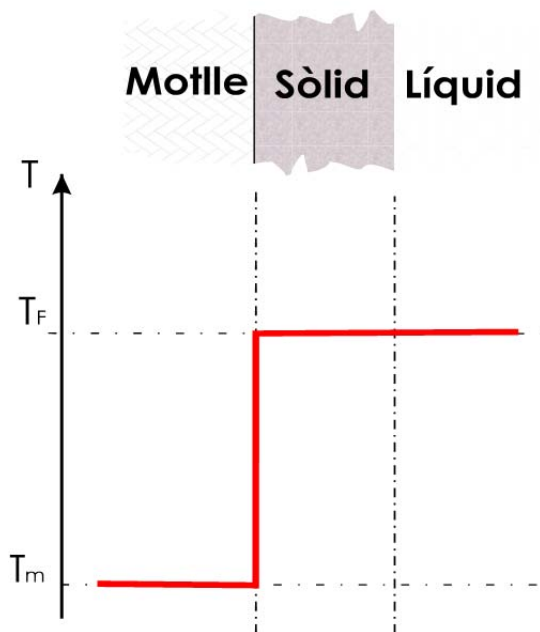


Figura 2.8. Perfil de temperatures per al cas de solidificació en què la dissipació està dominada per la resistència motlle-sòlid. És el cas dels motlles metàl·lics.

Per a un volum solidificat, V , s'haurà generat una quantitat de calor igual a

$$Q = V \cdot \rho_L \cdot l \quad (3)$$

on ρ_L és la densitat del líquid. La calor transportada per unitat de temps i d'àrea genera el salt tèrmic a la cara interna del motlle segons la fórmula:

$$\frac{Q}{A \cdot t} = h(T_F - T_m) \quad (4)$$

on h és la resistència tèrmica i T_m és la temperatura del motlle. De les dues equacions eliminem Q i obtenim:

$$V = A \frac{h(T_F - T_m)}{\rho_L \cdot l} t \quad (5)$$

o bé:

$$t = \frac{\rho_L l}{h(T_F - T_m)} \frac{V}{A} \quad (6)$$

Aquesta darrera fórmula ens dona el temps necessari per solidificar una peça de volum total V i àrea A . En aquest cas, el temps és proporcional al quocient V/A . La fórmula ens diu, també, que si el motlle està refrigerat (T_m baixa) el procés és més ràpid.

Exemple 1. S'injecta a pressió alumini dins d'un motlle refrigerat a 50°C . En aquestes condicions la peça se solidifica en 4 segons. Quant trigarà a solidificar-se si la temperatura del motlle és de 100°C ? Nota: suposem que el líquid no està sobreescalfat. $T_F(\text{Al}) = 660^\circ\text{C}$.

El temps de solidificació quan la temperatura del motlle és T_{m1} val:

$$t_1 = \frac{\rho_L l}{h(T_F - T_{m1})} \frac{V}{A}$$

Si dividim ordenadament per a les dues temperatures, obtenim:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{T_F - T_{m2}}{T_F - T_{m1}} = 0,92 \quad \text{per tant,} \quad t_2 = \frac{t_1}{0,92} = 4,3 \text{ s}$$

b) *Dissipació dominada per la resistència del motlle.* És un cas vàlid per a motlles de sorra (aïllants) i peces de volum petit comparat amb el del motlle i de geometria senzilla. Sense sobreescalfament, el salt tèrmic es produirà a través de tot el gruix del motlle (vegeu la figura). Igual com abans, la calor despresada val $Q = V \cdot \rho_L \cdot l$. El terme que canvia és la calor que s'extreu per unitat de temps, ja que ara és proporcional al gradient de temperatura a la cara interna del motlle (lleï de Fourier del transport de la calor):

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot A} = \kappa_m \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

on κ_m és la conductivitat tèrmica del motlle.

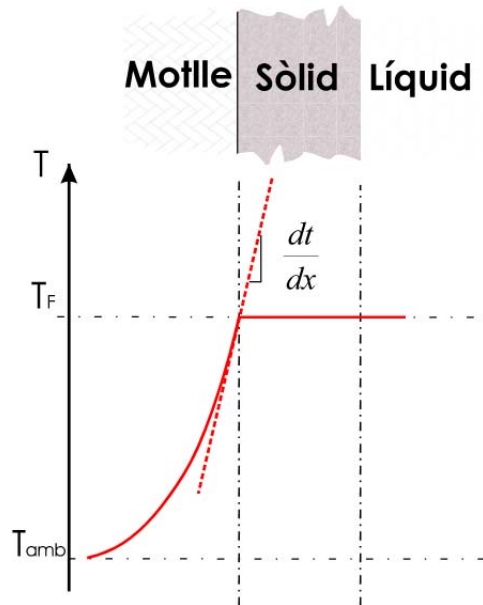


Figura 2.9. Perfil de temperatura en el cas de solidificació amb la dissipació dominada per la resistència del motlle. Seria el cas d'un motlle de sorra.

A mesura que el temps avança, el motlle es va escalfant i el gradient (dT/dx) disminueix (vegeu la Figura 2.10). És a dir, que la solidificació és cada vegada més lenta. En conseqüència, el volum solidificat no serà proporcional al temps (com en el cas a). Es pot demostrar que la relació entre el volum solidificat i el temps és donat per la fórmula:

$$t = C \left(\frac{\rho_L l}{T_F - T_{amb}} \right)^2 \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (8)$$

coneguda com la *regla de Chvorinov*, on C és una constant que depèn de les propietats tèrmiques del motlle:

$$C = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{k_m \rho_m c_m} \right) \quad (9)$$

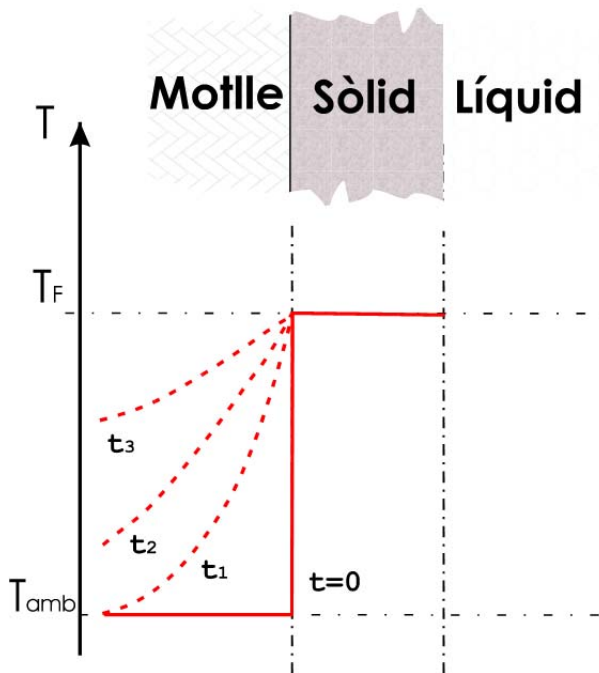


Figura 2.10. El gradient de temperatura va disminuint a mesura que el motlle es va escalfant.

Comparem les solucions dels dos casos (a i b) en una mateixa gràfica (Figura 2.11). Veiem que, quan el motlle és de sorra, el temps de solidificació creix ràpidament per a peces gruixudes (V/A gran) i que aquesta tendència és més accentuada en el cas del motlle de sorra (b).

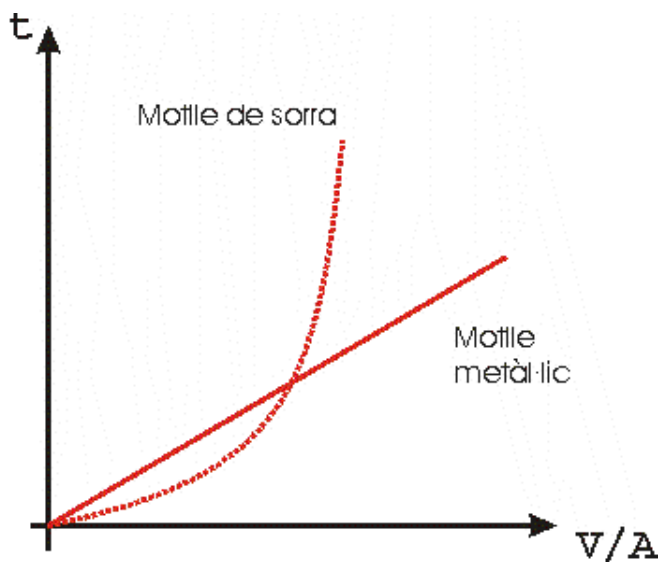


Figura 2.11. Comparació del temps de solidificació en un motlle metàl·lic i un de sorra

Exemple 2. En un motlle de sorra, una peça esfèrica massissa triga 5 minuts a solidificar-se. Quant trigarà un cilindre massís del mateix radi i de longitud $3R$? Quin seria el resultat si la barra fos molt llarga?

Com que el motlle és del mateix material i del mateix metall en els dos casos, la constant C pren el mateix valor. Podem escriure, doncs:

$$t_E = C \left(\frac{V}{A} \right)_E^2 = C \left(\frac{R}{3} \right)^2 \quad \text{i} \quad t_C = C \left(\frac{V}{A} \right)_C^2 = C \left(\frac{3R}{8} \right)^2$$

on els subíndexs E i C signifiquen “esfera” i “cilindre”, respectivament, i hem calculat la relació V/A en cada cas. Si dividim ordenadament, obtenim:

$$t_C = \left(\frac{9}{8} \right)^2 t_E = 1,27 t_E = 6,35 \text{ min.}$$

Si la barra fos molt llarga, llavors,

$$\left(\frac{V}{A} \right)_C = \frac{R}{2} \quad \text{i obtindríem} \quad t_C = \left(\frac{3}{2} \right)^2 t_E = 11,25 \text{ min.}$$

2.1.5. Contracció

El refredament i la solidificació normalment comporten una contracció del volum del material. De fet, hi ha molt pocs metalls que es dilaten durant la solidificació. En general, podem escriure la fórmula següent, que ens permet calcular la contracció total des de l'estat líquid fins a l'estat sòlid a temperatura ambient:

$$\frac{\Delta V}{V} = 3\alpha_S (T_F - T_{amb}) + \delta_F + 3\alpha_L (T_L - T_F) \quad (10)$$

on V és el volum del líquid i ΔV és la variació de volum total; α_i són els coeficients de dilatació lineal ($\alpha > 0$) i δ_F és la contracció volumètrica per solidificació (normalment, $\delta_F > 0$).

Com que el líquid omple tota la cavitat del motlle, resulta que les peces solen ser més petites que la cavitat. Si es volen toleràncies dimensionals estretes, aquest efecte s'ha de tenir en compte i dissenyar una cavitat lleugerament més gran. De tota manera, s'ha de remarcar que per colament és difícil obtenir una bona precisió dimensional.

Una manera de contrarestar parcialment la contracció és amb l'ús de reservoris de líquid, anomenats *massalotes*. En la Figura 2.12 s'explica l'efecte que tenen sobre el *xuclet*.

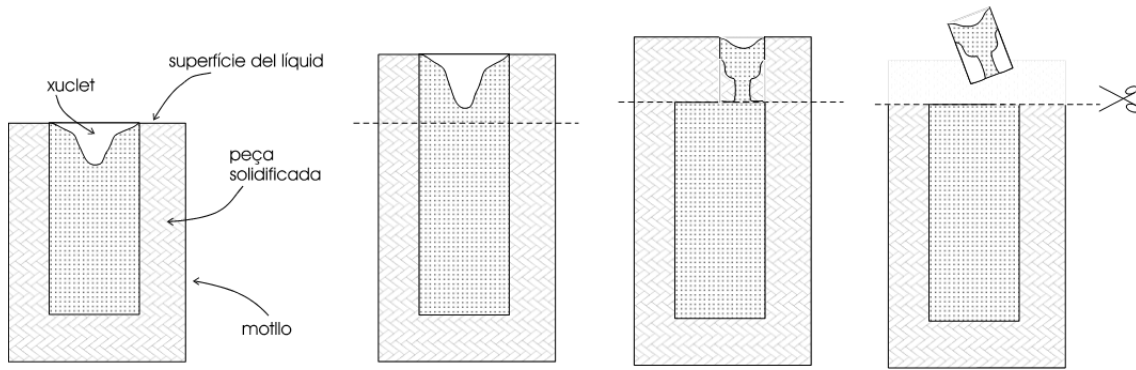


Figura 2.12. Ús de les massalotes per eliminar l'efecte del xuclet.

Exemple 3. Les densitats del coure sòlid i líquid, mesurades a la temperatura de fusió, valen $8,48 \text{ g/cm}^3$ i $7,97 \text{ g/cm}^3$, respectivament. Calculem el valor de δ_F . Calculem el volum d'una peça solidificada si el del motlle és de 20 cm^3 .

Clarament la variació de la densitat indica que una massa donada de coure, m , ocupa un volum més gran en l'estat líquid. La conservació de la massa ens permet escriure l'equació:

$$V_S \rho_S = V_L \rho_L \quad \text{que, juntament amb la definició} \quad \Delta V \equiv V_L - V_S,$$

ens porta a la relació buscada: $\left. \frac{\Delta V}{V_L} \right|_{T_f} = 1 - \left. \frac{\rho_L}{\rho_S} \right|_{T_f}$. Com que el canvi de volum és

a la temperatura de fusió, correspon justament a δ_F , que valdrà: $\delta_F = 6\%$. El volum de la peça serà, doncs, de $18,8 \text{ cm}^3$.