

05

FUNDIÇÃO

Engenharia Mecânica
Prof. Luis Fernando Maffeis Martins

Solidificação

Transformação do estado líquido para o estado sólido.



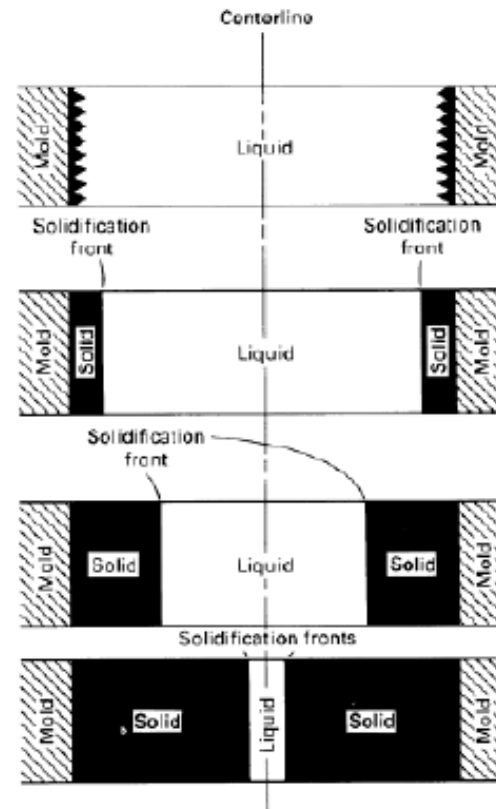
Frentes de solidificação

Ligas que solidificam
com temperatura constante



INTERFACE PLANA

- METAIS PUROS
- COMPOSIÇÃO EUTÉTICA



Representação esquemática do modelo de solidificação de um metal puro

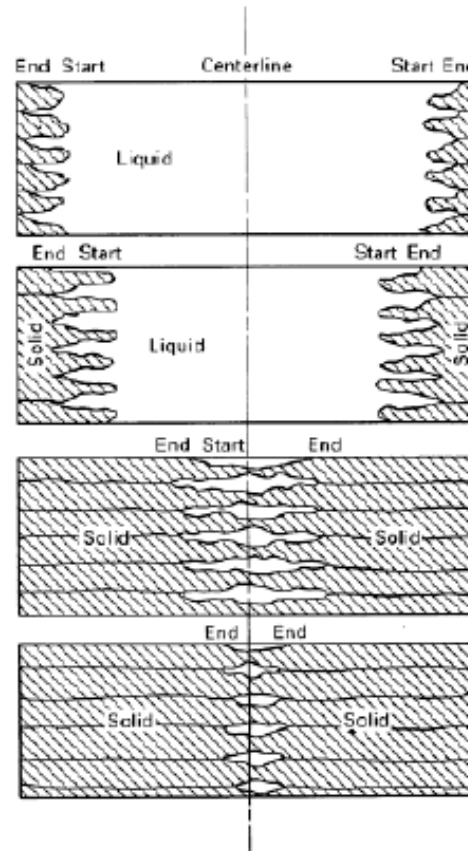
Frentes de solidificação

Ligas com pequeno
intervalo de solidificação



**FRENTE DE SOLIDIFICAÇÃO
PLANA**

- AÇOS
- FERROS FUNDIDOS
- LATÕES



Representação esquemática do modelo de solidificação de uma liga com pequeno intervalo de solidificação.

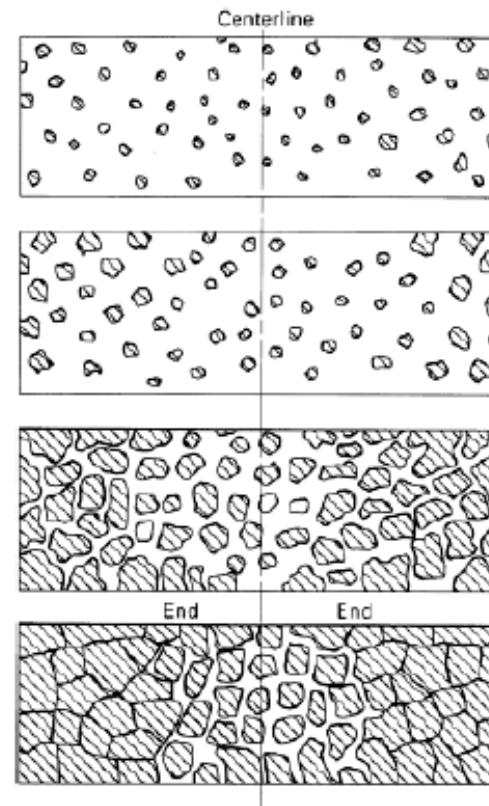
Frentes de solidificação

Ligas com grande
intervalo de solidificação



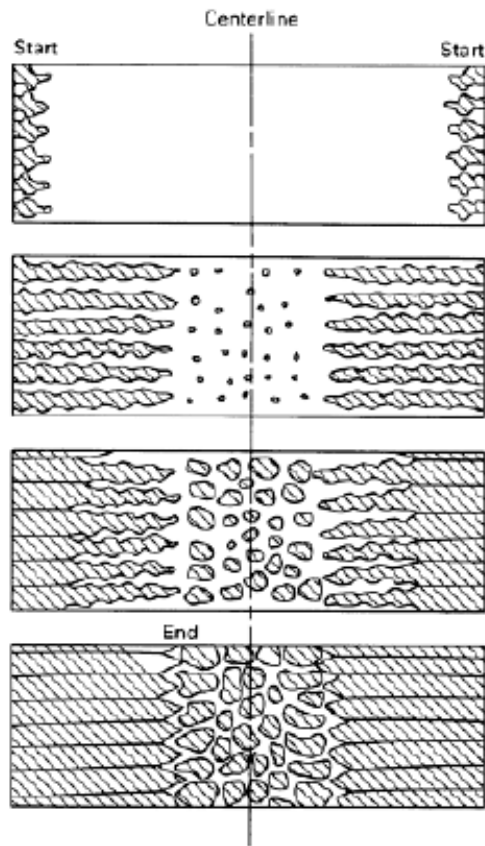
FRENTE DE SOLIDIFICAÇÃO
DENDRÍTICA

- LIGAS DE AL HIPOEUTÉTICAS
- BRONZES



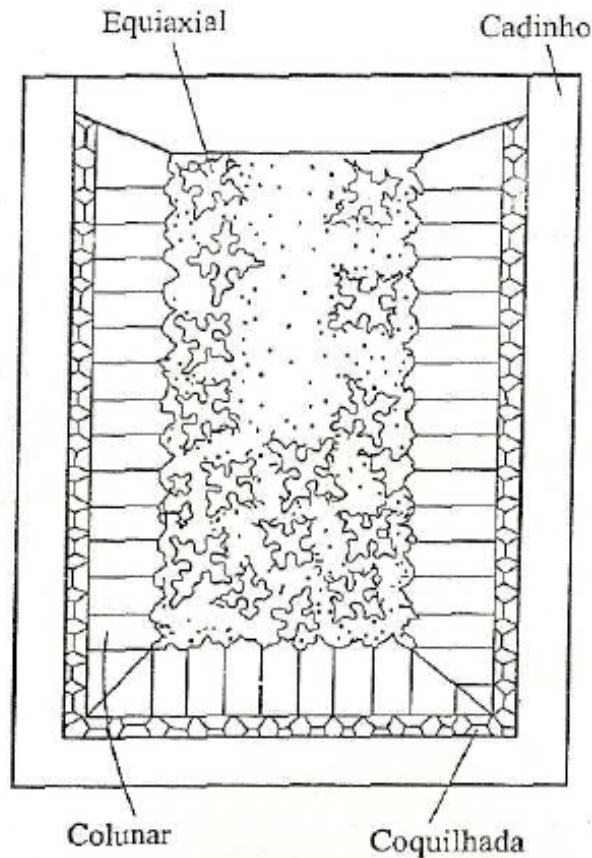
Representação esquemática do modelo de solidificação de uma liga com grande intervalo de solidificação.

Frentes de solidificação



Representação esquemática do modelo
de solidificação de uma liga com
intervalo de solidificação médio

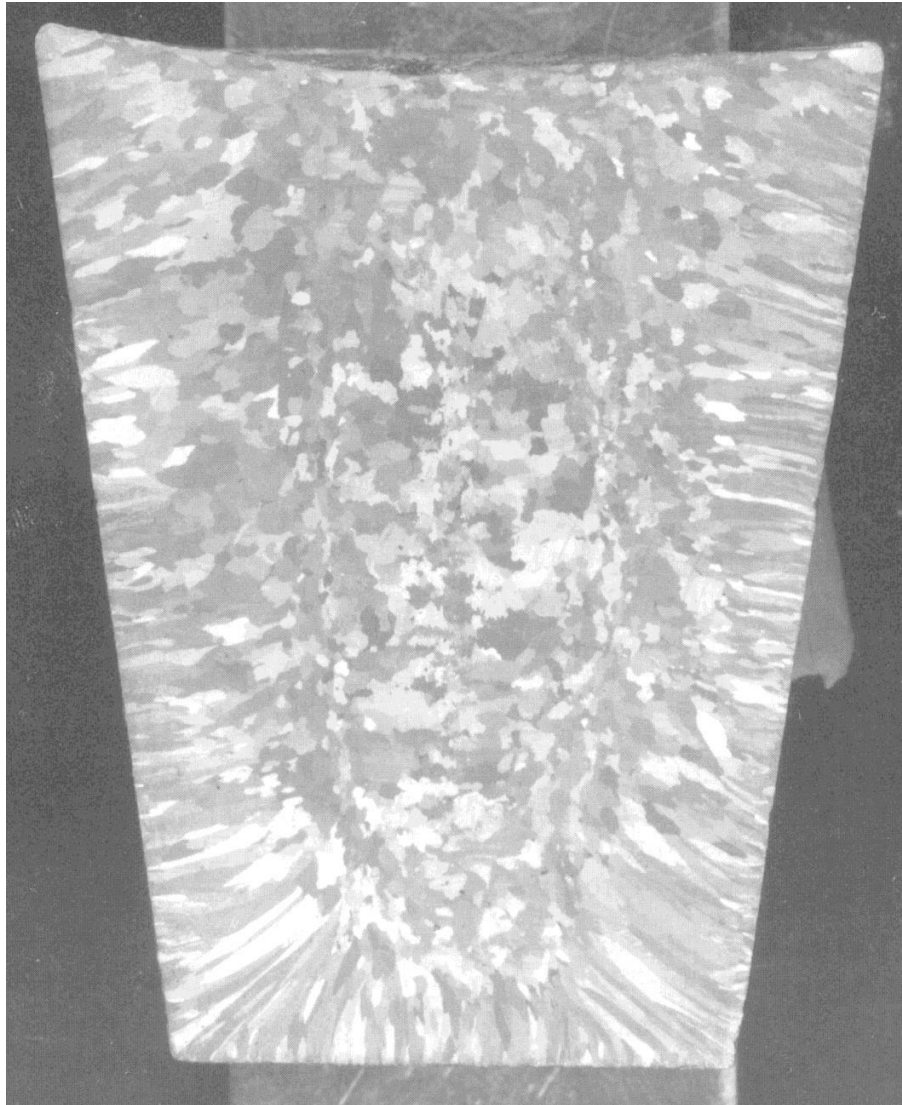
Frentes de solidificação



Representação esquemática dos três tipos de estruturas “brutas de fusão” normalmente existentes nos lingotes:

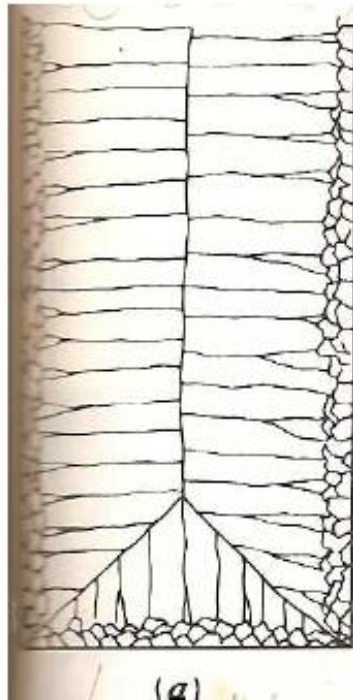
- **Zona Coquilhada:** é formada por pequenos grãos equiaxiais de orientação cristalográfica aleatória junto a interface metal-molde.
- **Zona Colunar:** formada por grãos alongados e finos que se alinham paralelamente a direção do fluxo de calor.
- **Zona Equiaxial Central:** formada por grãos equiaxiais de orientação cristalográfica aleatória.

Frentes de solidificação

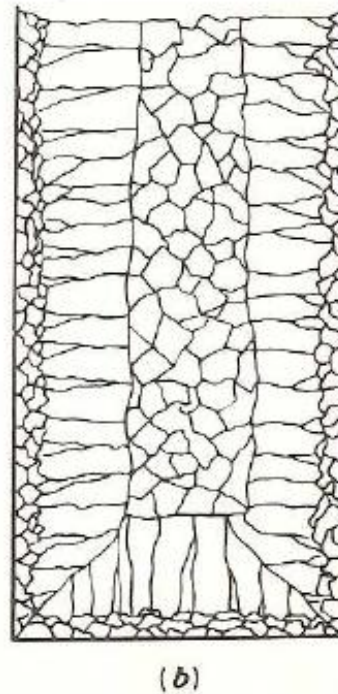


Frentes de solidificação

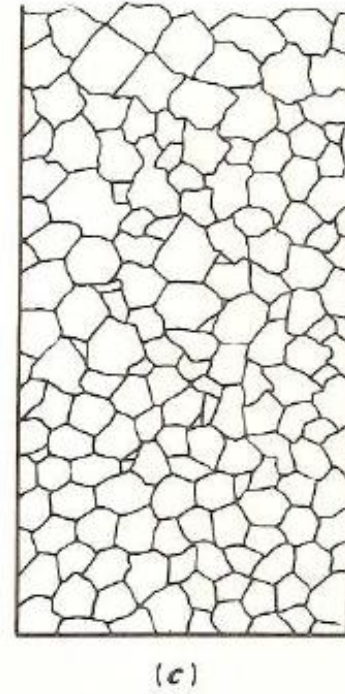
Liga com pequeno ΔT



Liga com médio ΔT



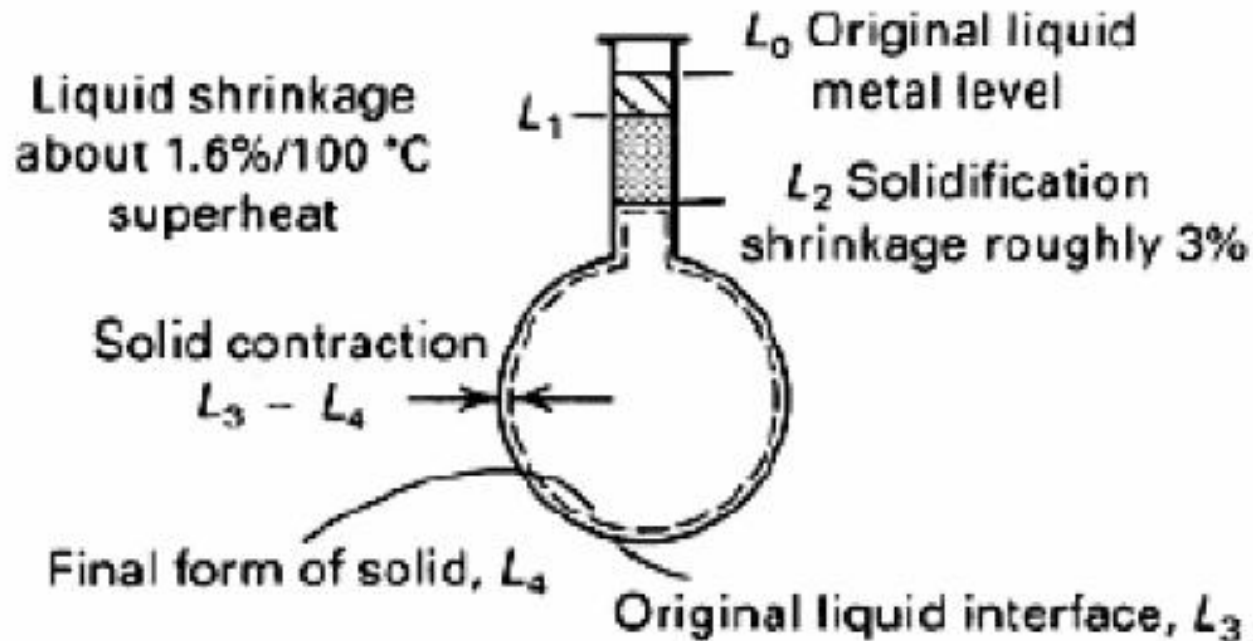
Liga com grande ΔT



Possíveis variações na macroestrutura de um lingote.

- (a) Ausência da Zona Equiaxial Central (b) Presença das três Zonas (c) Ausência das Zonas Coquilhada e Colunar.

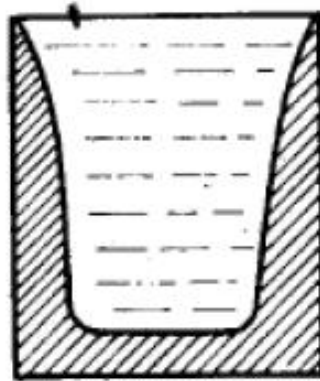
Contrações durante a solidificação



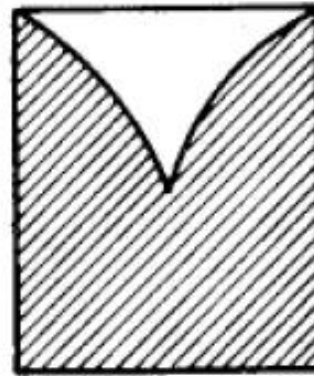
Contrações durante a solidificação



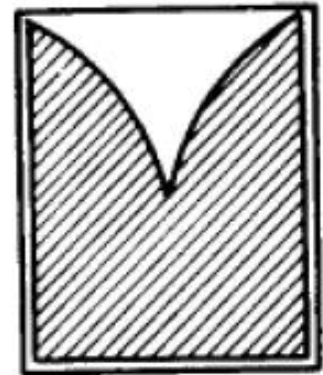
(a)



(b)



(c)



(d)

Contrações durante a solidificação

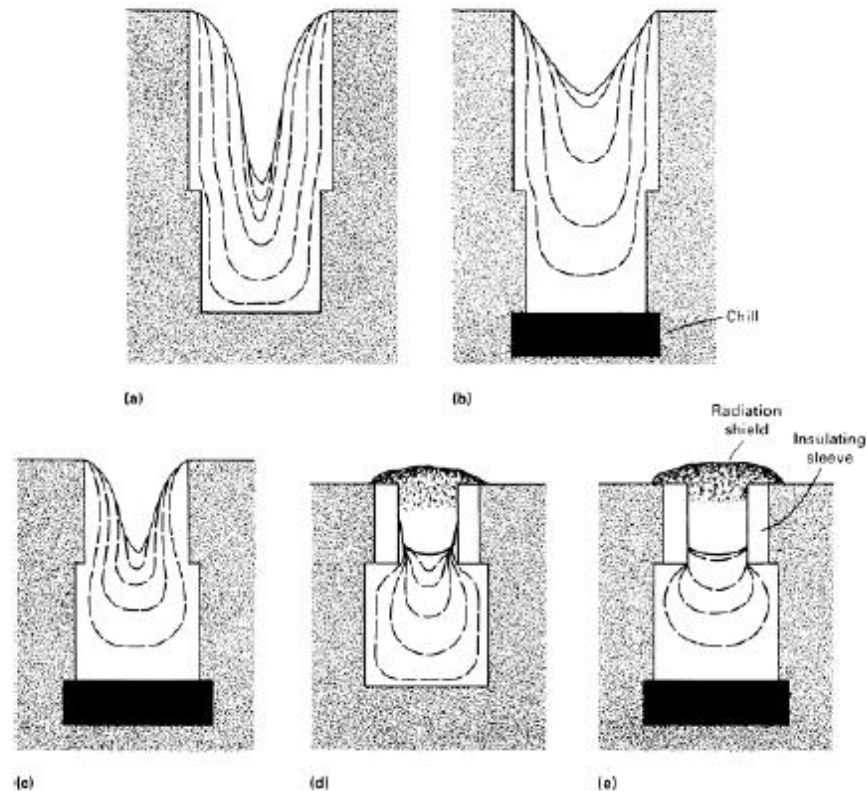
- **Contração líquida:** ↓ da T até o início da solidificação.
- **Contração de solidificação:** variação de volume durante a mudança de estado $L \rightarrow S$.
- **Contração sólida:** variação de volume que ocorre no estado sólido, entre a T fim de solidificação e a T ambiente.

Contrações durante a solidificação

Tabela I: Valores de Contração Volumétrica de Solidificação para alguns metais e ligas.

MATERIAL	CONTRAÇÃO (%)
Aço carbono	2,5 – 3,5
Alumínio	6,5
Cobre	5,0
Ferro fundido branco	4,0 – 5,5
Ferro fundido cinzento	0 – 2,0

Contrações durante a solidificação



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

Contrações durante a solidificação

Liga Al- 8%Si + 3,5%Cu



Massalotes

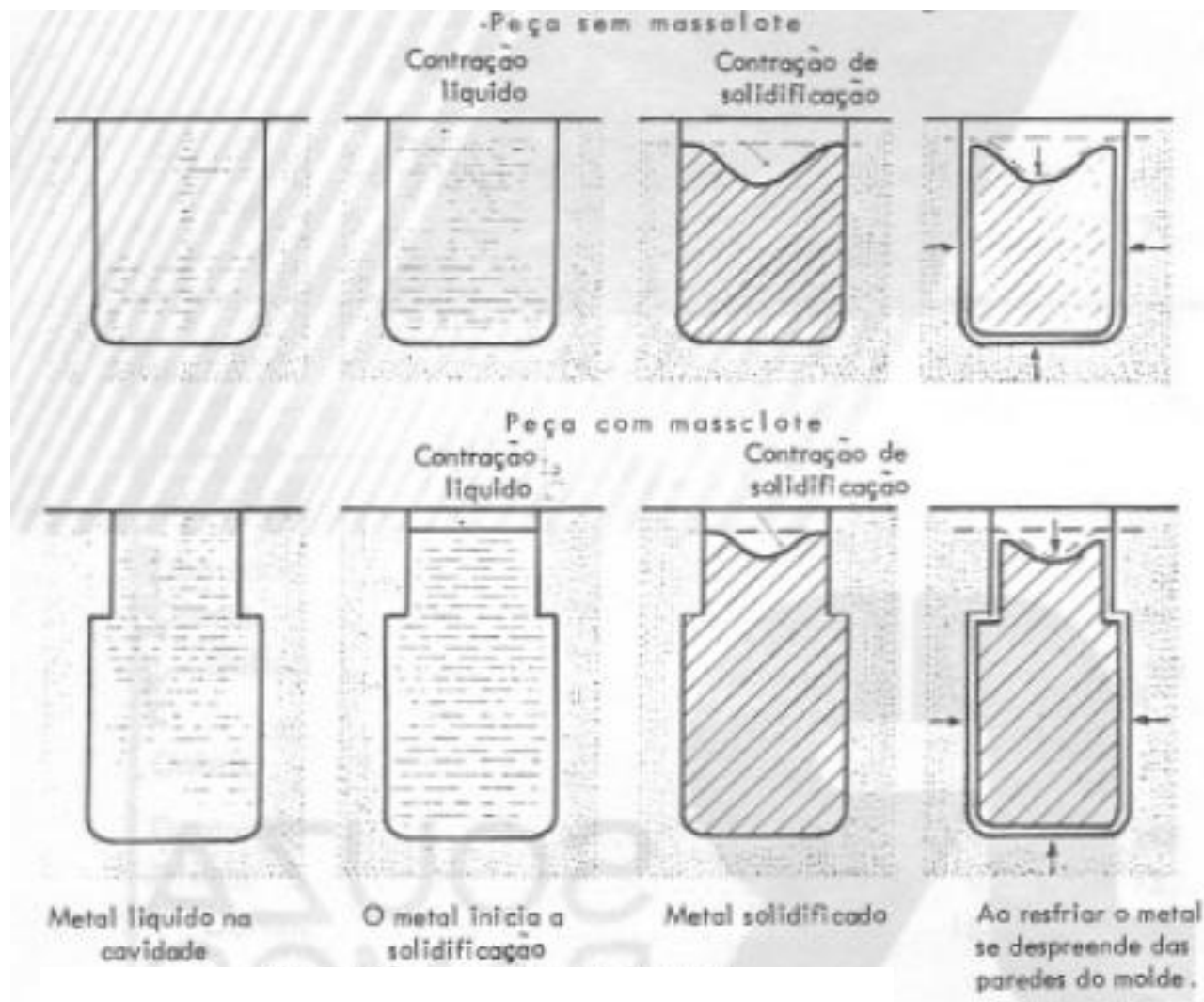
A contração que ocorre durante a solidificação pode causar porosidade e rechupe nas peças, comprometendo a qualidade dos produtos fundidos.

Para evitar estes defeitos e garantir a sanidade interna das peças fundidas, faz-se o uso de massalotes, que são reservas de metal fora da peça para compensar dois tipos de contração:

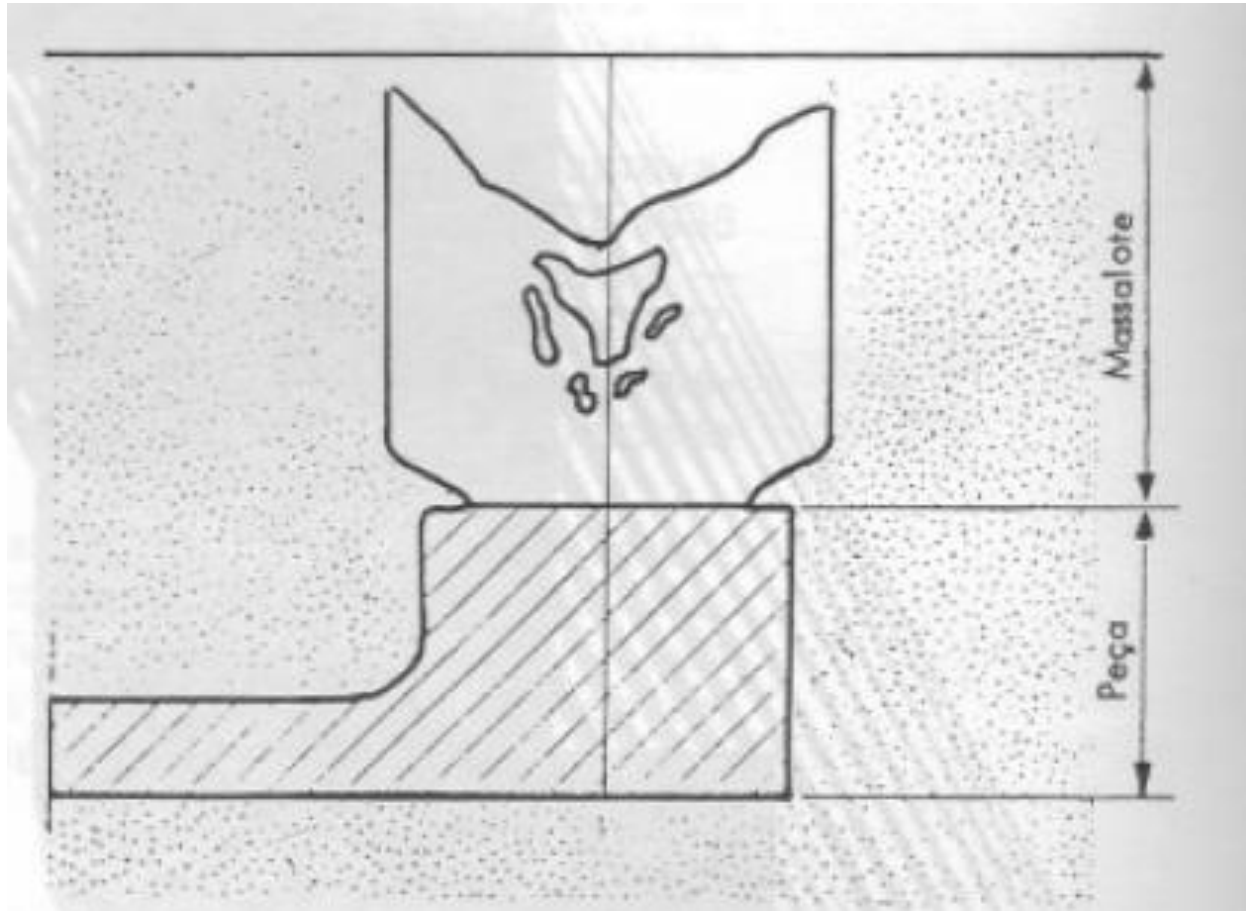
- contração do estado líquido
- contração da solidificação

Para se corrigir a contração do estado sólido faz-se uma compensação aumentando-se as dimensões do molde onde o metal é vazado.

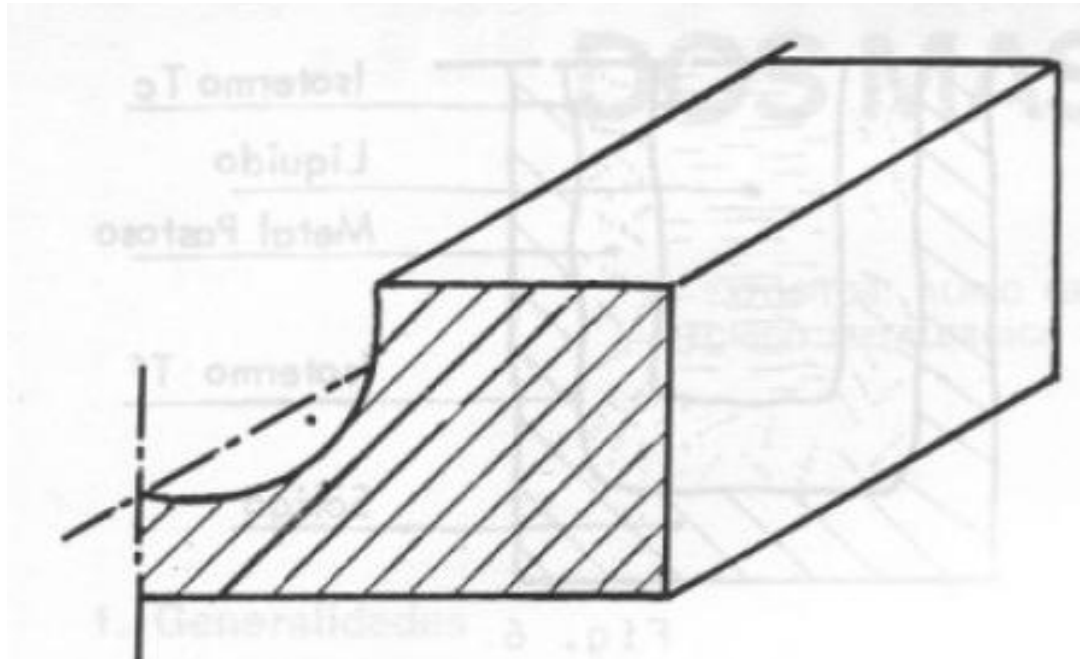
Massalotes



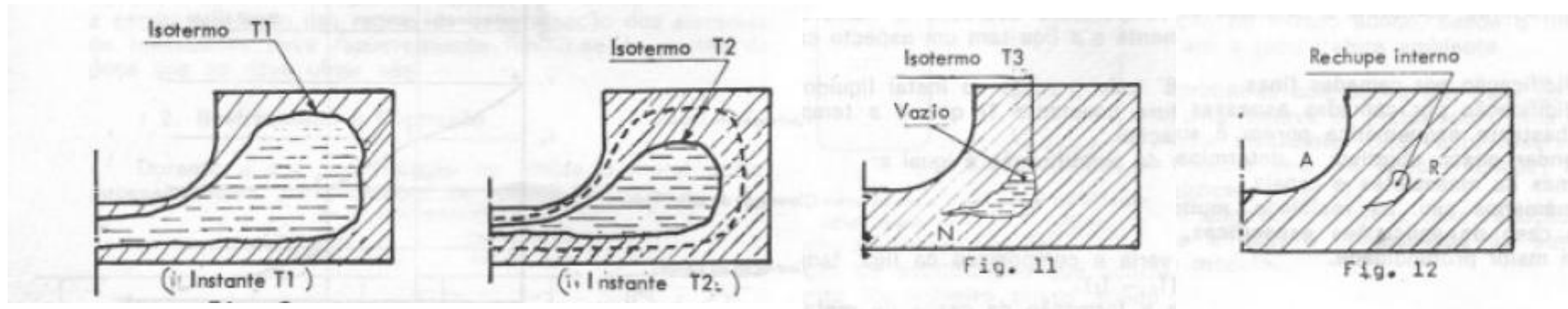
Massalotes



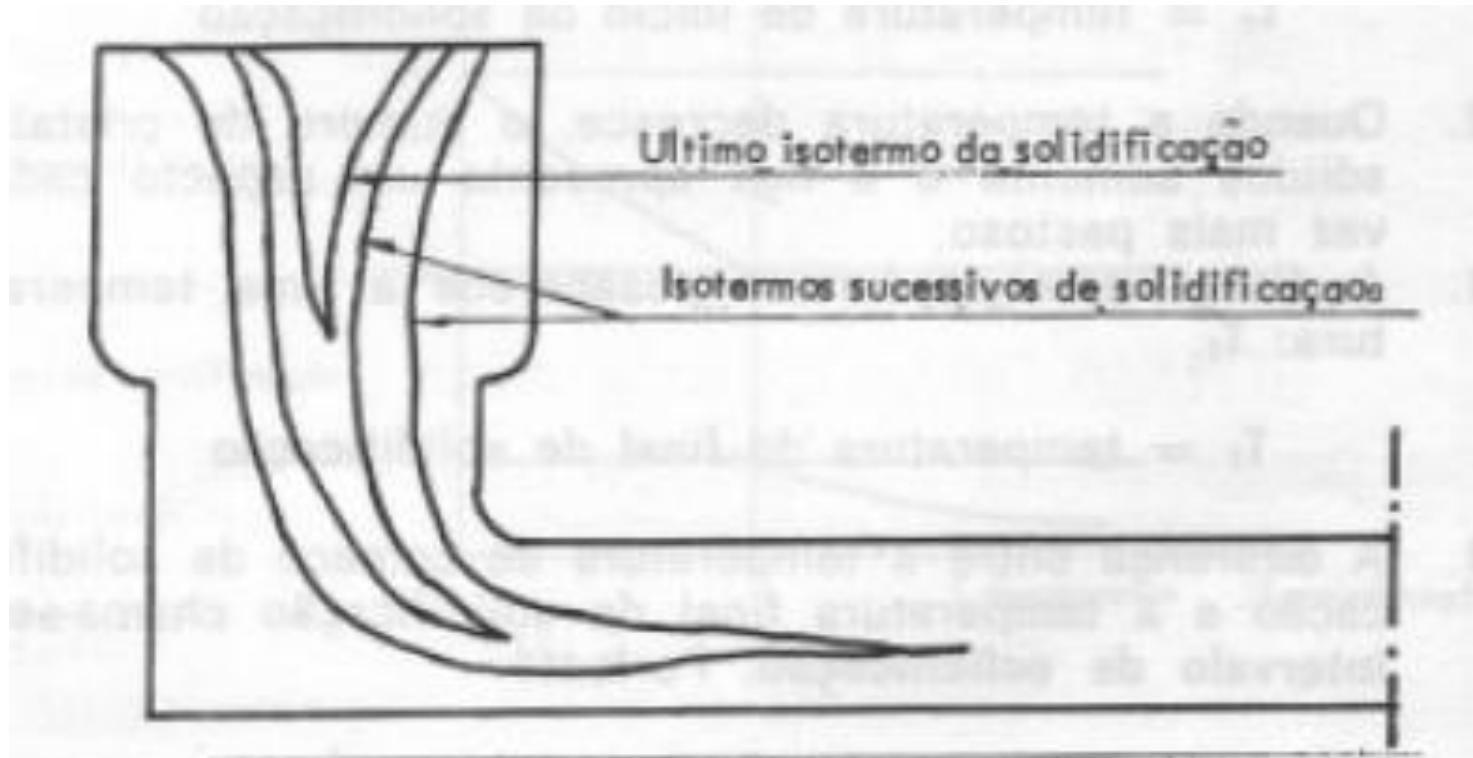
Formação de rechupe



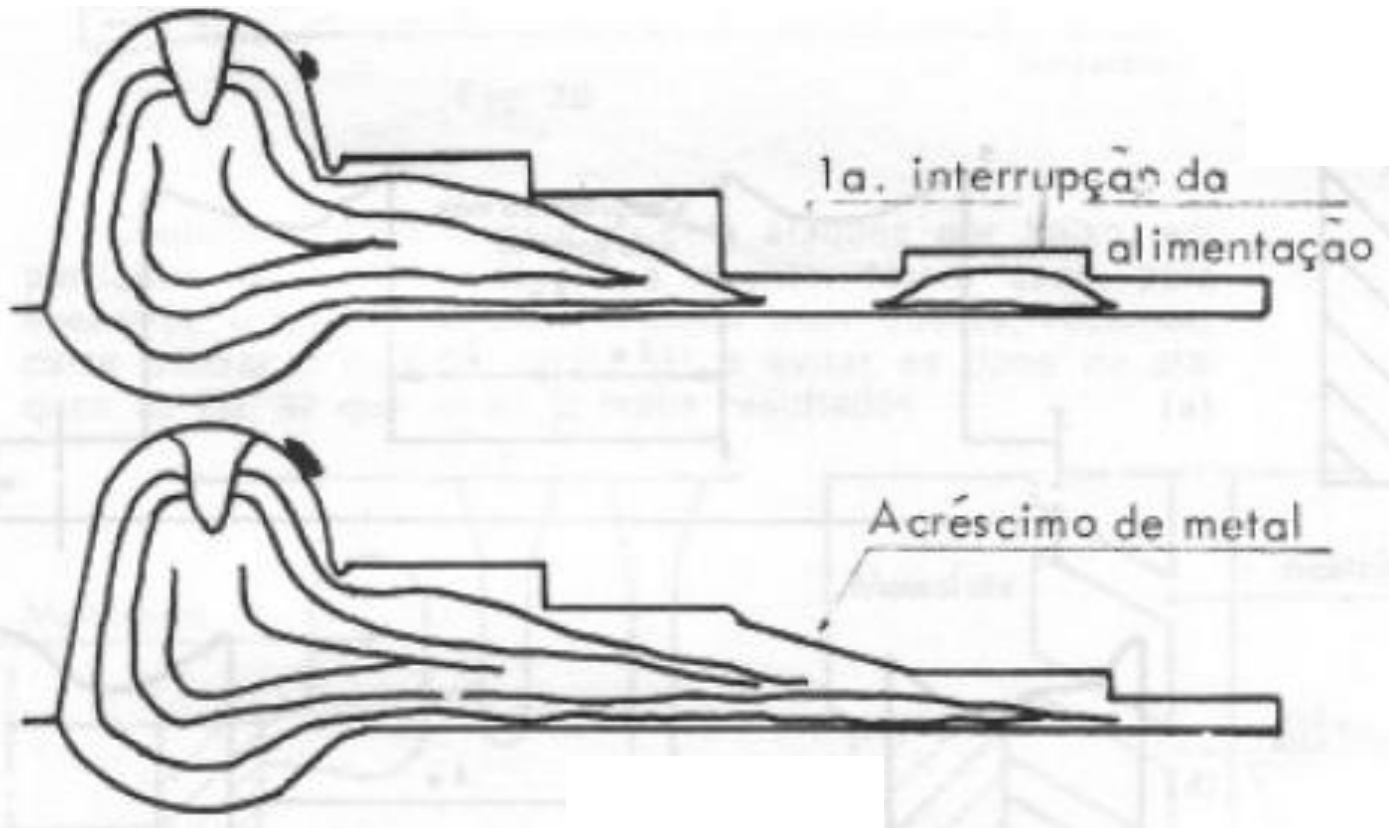
Formação de rechupe



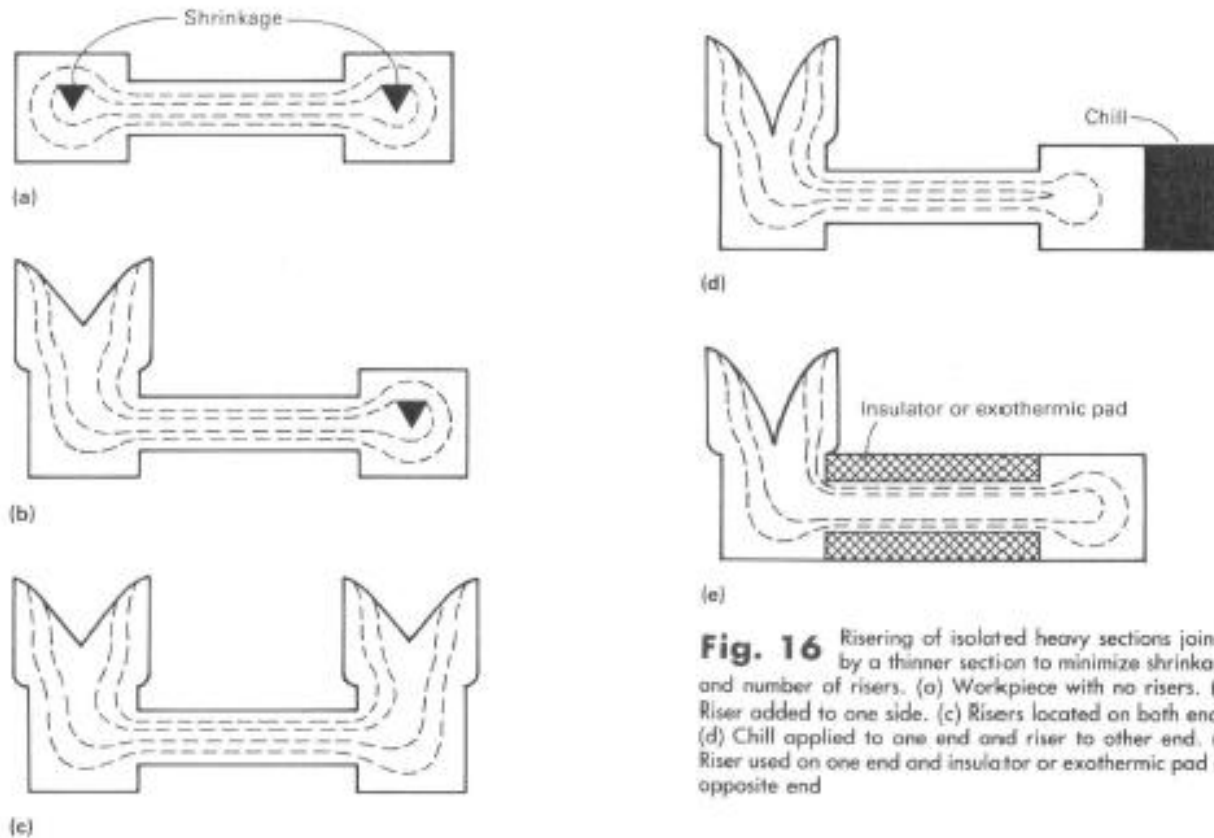
Solidificação dirigida



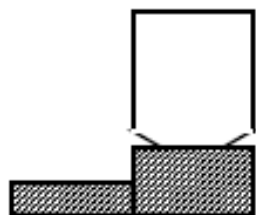
Solidificação dirigida



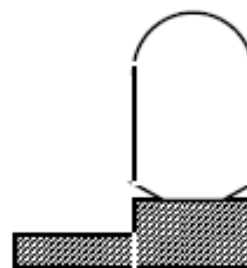
Solidificação dirigida (coquilhas e isolantes)



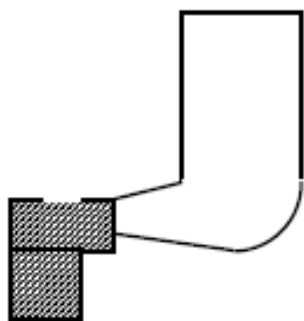
Tipos de massalotes



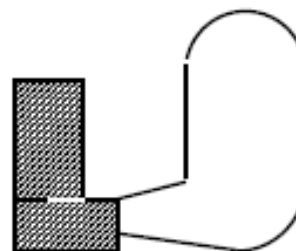
Aberto – De topo



Cego – De topo



Aberto – Lateral



Cego – Lateral

Funções dos massalotes

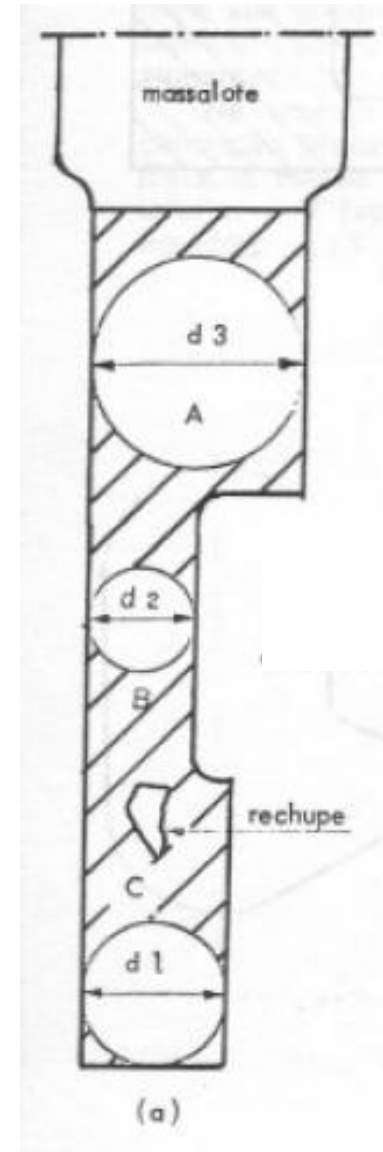
- Os massalotes devem satisfazer a 5 condições básicas:
 - estar localizado junto à parte da peça que solidifica por último
 - solidificar após a solidificação da peça
 - conter massa suficiente de metal líquido para compensar a contração da peça
 - exercer pressão durante a solidificação da peça suficiente para vencer resistências como entrelaçamento de dendritas, viscosidade da região pastosa, atrito, facilitando a penetração do metal líquido nos rechupes em formação
 - ter a menor massa possível sem perder sua eficácia, visando a redução de custos do processo de fundição

Funções dos massalotes

- Os massalotes devem satisfazer a 5 condições básicas:
 - **estar localizado junto à parte da peça que solidifica por último**
 - **solidificar após a solidificação da peça**
 - conter massa suficiente de metal líquido para compensar a contração da peça
 - exercer pressão durante a solidificação da peça suficiente para vencer resistências como entrelaçamento de dendritas, viscosidade da região pastosa, atrito, facilitando a penetração do metal líquido nos rechupes em formação
 - ter a menor massa possível sem perder sua eficácia, visando a redução de custos do processo de fundição

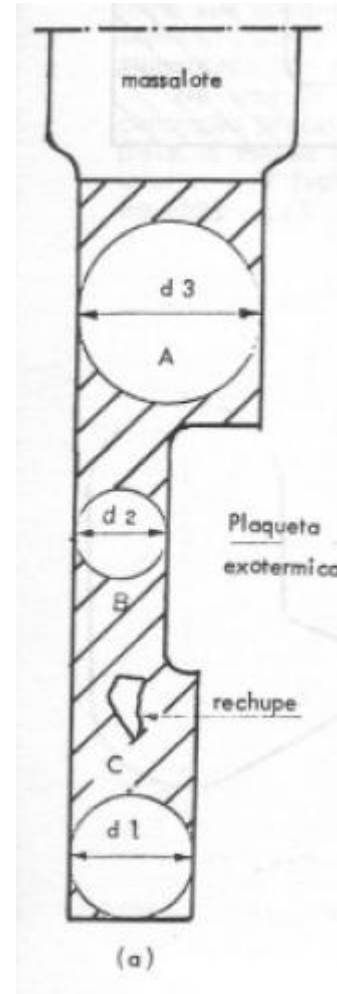
Funções dos massalotes

Regra dos círculos inscritos:
regiões com menores
círculos inscritos completam
a solidificação antes



Funções dos massalotes

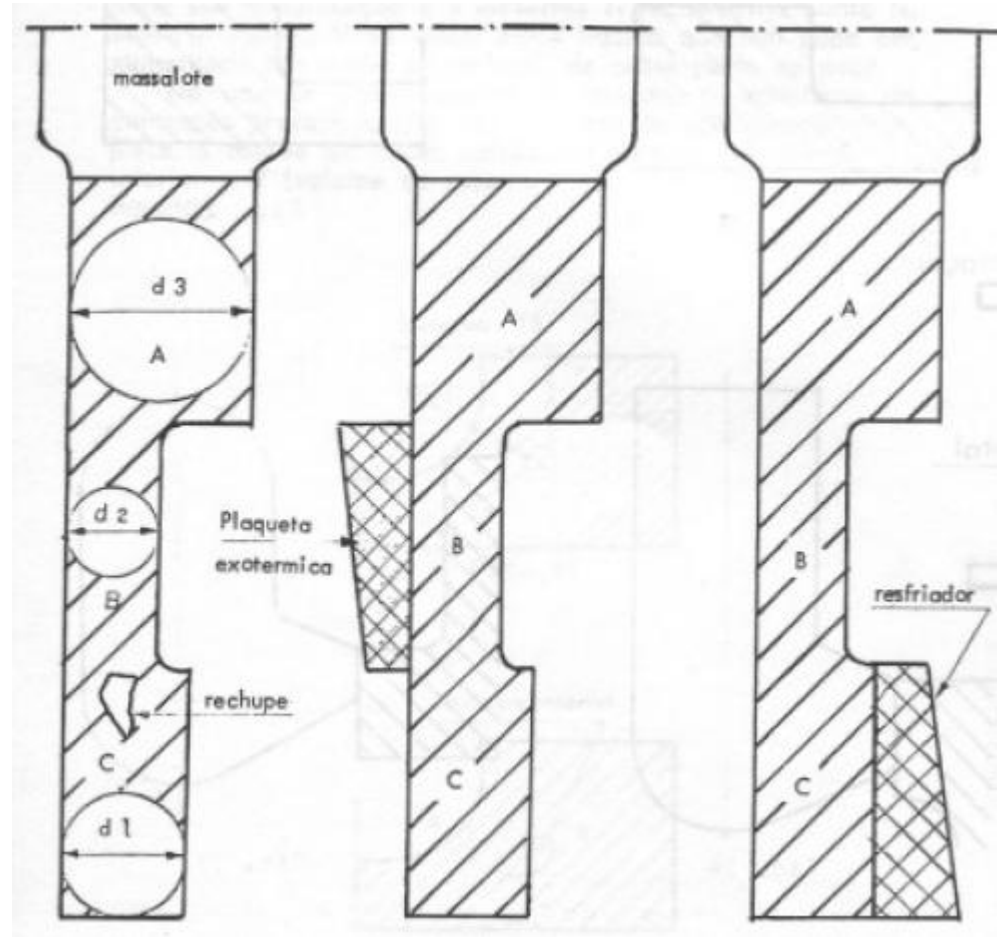
como evitar o rechupe?



Funções dos massalotes

como evitar o rechupe?

uso de isolantes ou
coquilhas



Funções dos massalotes

Regra do módulo de resfriamento (MR):

calcula-se a relação entre o volume da peça (ou parte da peça a ser alimentada) e a superfície da peça (ou parte a ser alimentada) que sofre resfriamento através das paredes do molde;

$$MR = V/S$$

quanto maior o módulo, mais tarde se completa a solidificação

Funções dos massalotes

Regra dos módulos parciais:

$$MR = V/S$$



$$TS = k \cdot MR^n$$

TS = tempo de solidificação

k = constante

n = fator de 1,5 a 2

Funções dos massalotes

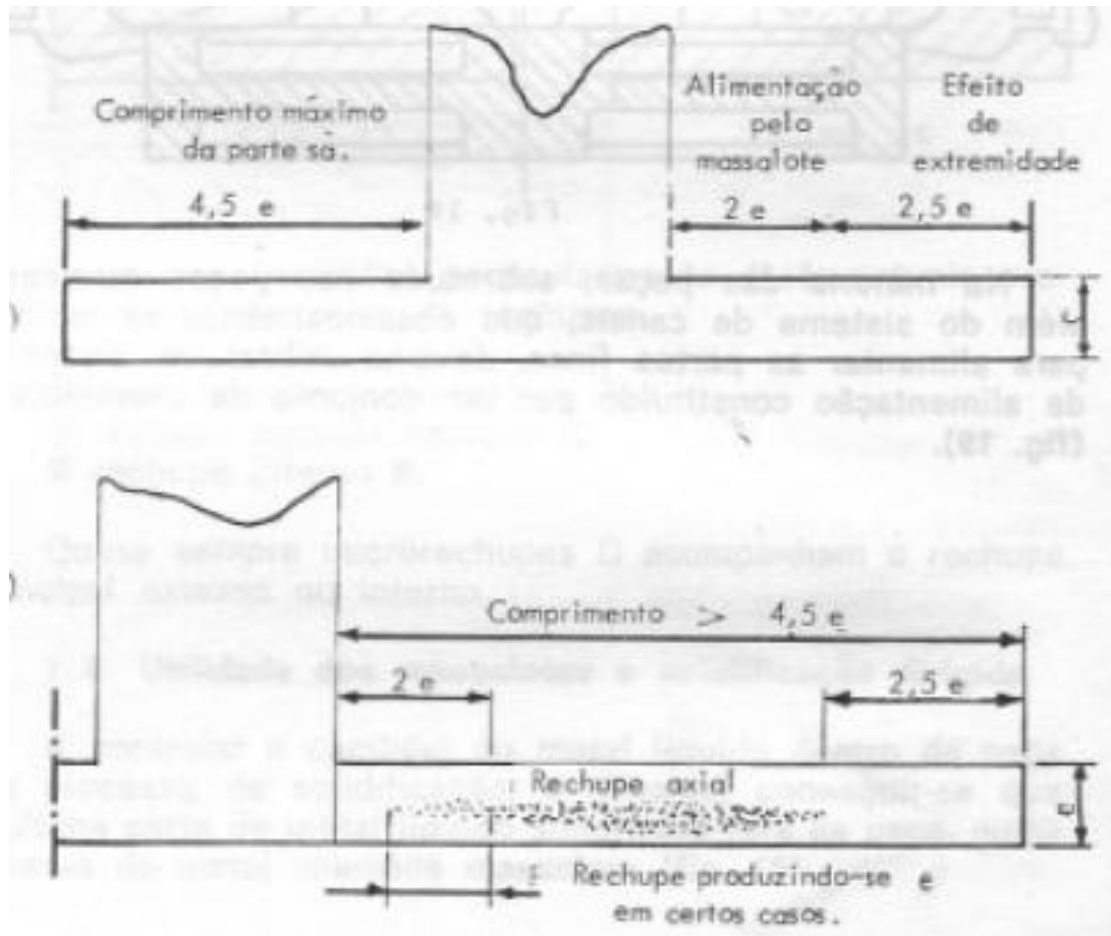
Exercício:

Calcular o módulo de resfriamento para:

- esfera
- chapa
- cubo
- cilindro

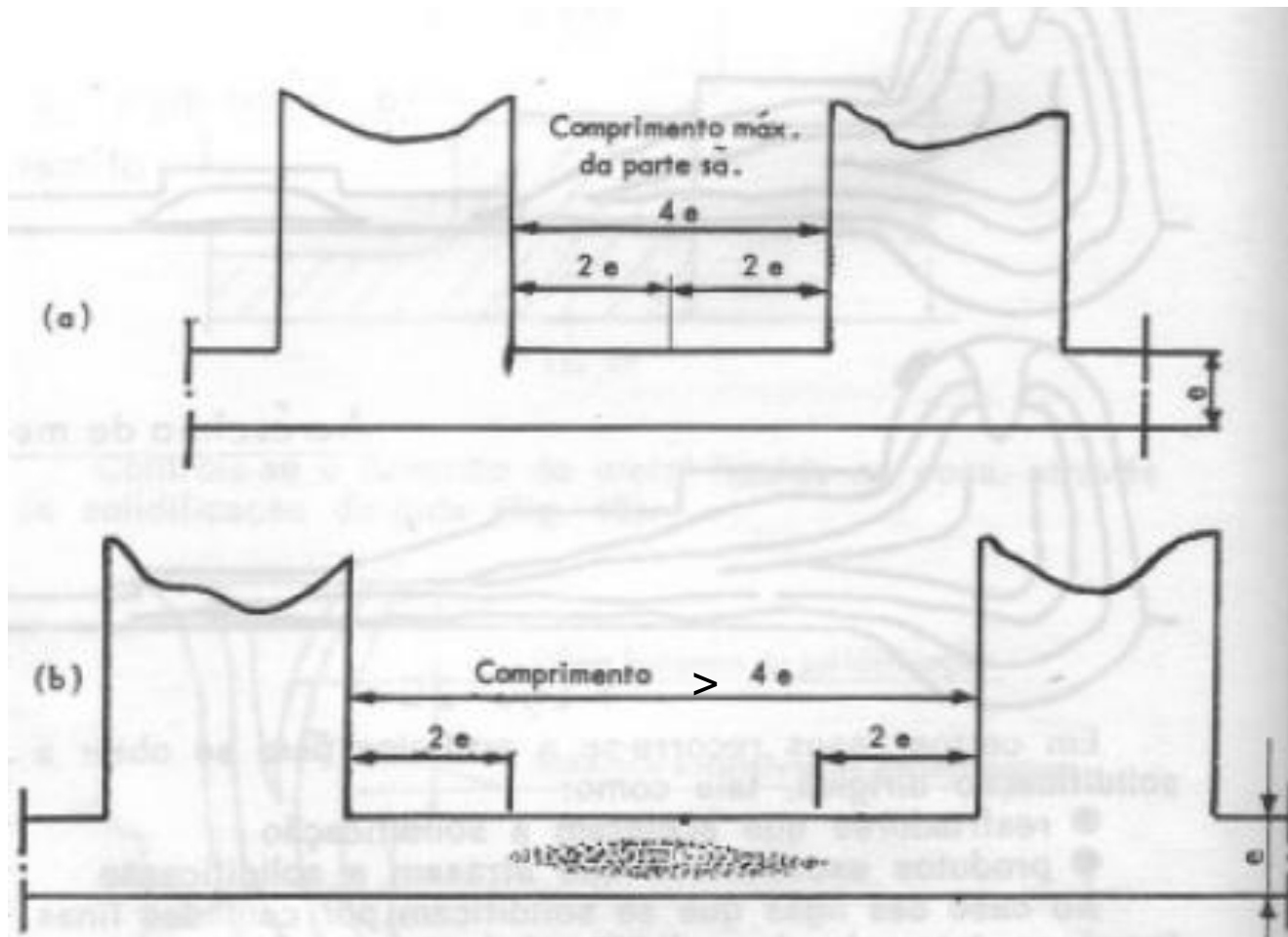
Funções dos massalotes

Comprovou-se experimentalmente que os massalotes são eficazes até uma distância limite, não importando seu MR.



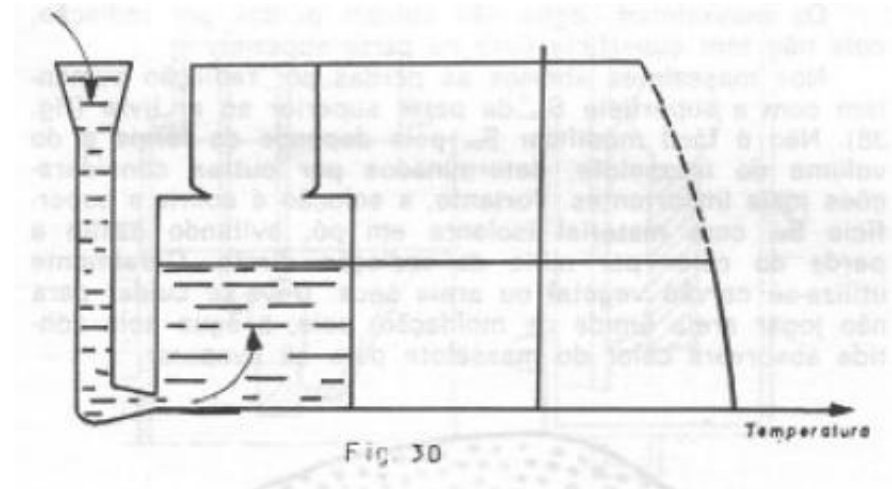
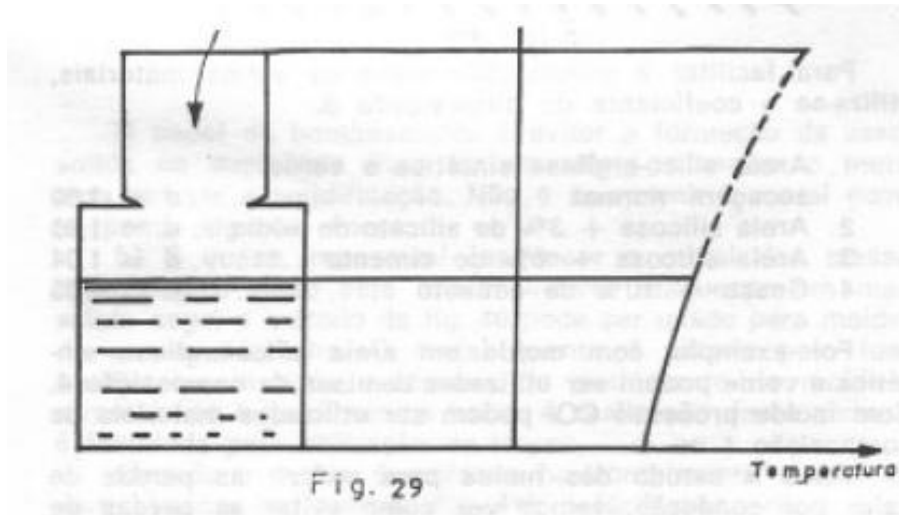
Funções dos massalotes

Comprovou-se experimentalmente que os massalotes são eficazes até uma distância limite, não importando seu MR.



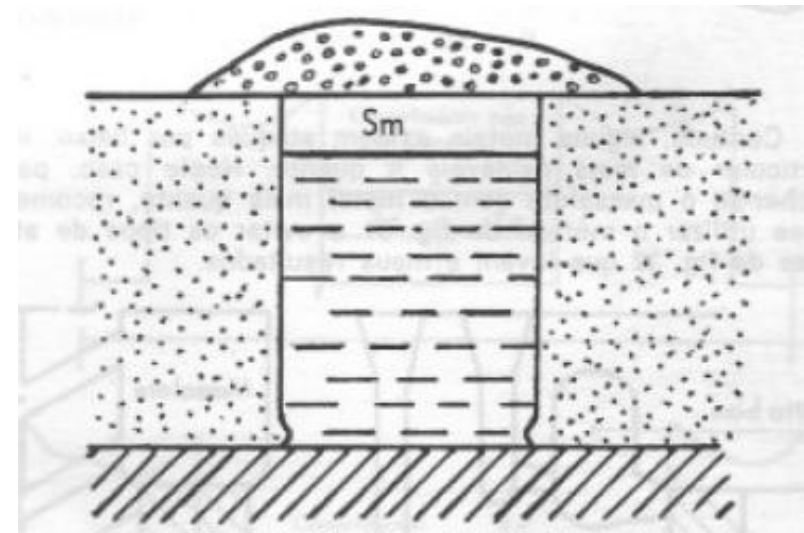
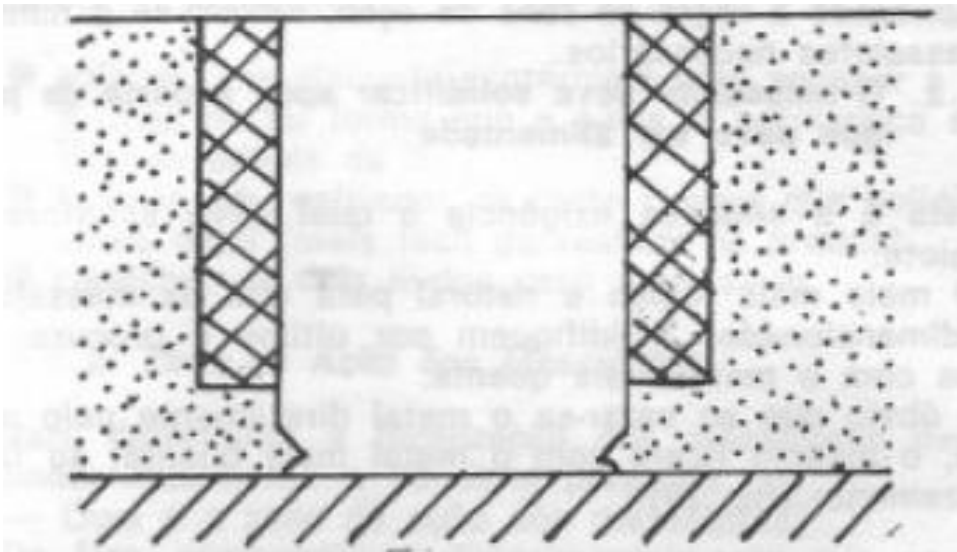
Funções dos massalotes

Objetivar temperatura do líquido presente no massalote maior do que no interior da peça



Funções dos massalotes

Uso de materiais isolantes para reduzir a perda de temperatura do massalote

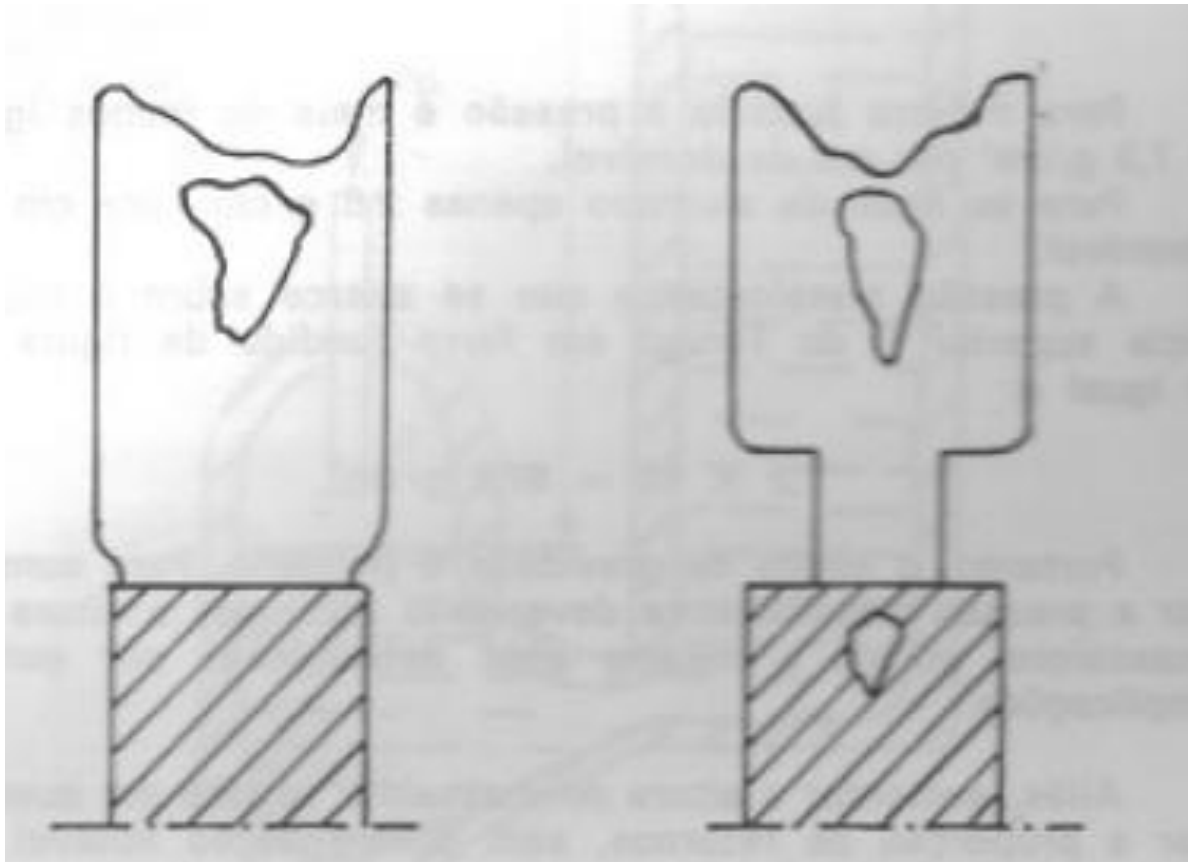


Funções dos massalotes

- Os massalotes devem satisfazer a 5 condições básicas:
 - estar localizado junto à parte da peça que solidifica por último
 - solidificar após a solidificação da peça
 - **conter massa suficiente de metal líquido para compensar a contração da peça**
 - exercer pressão durante a solidificação da peça suficiente para vencer resistências como entrelaçamento de dendritas, viscosidade da região pastosa, atrito, facilitando a penetração do metal líquido nos rechupes em formação
 - ter a menor massa possível sem perder sua eficácia, visando a redução de custos do processo de fundição

Funções dos massalotes

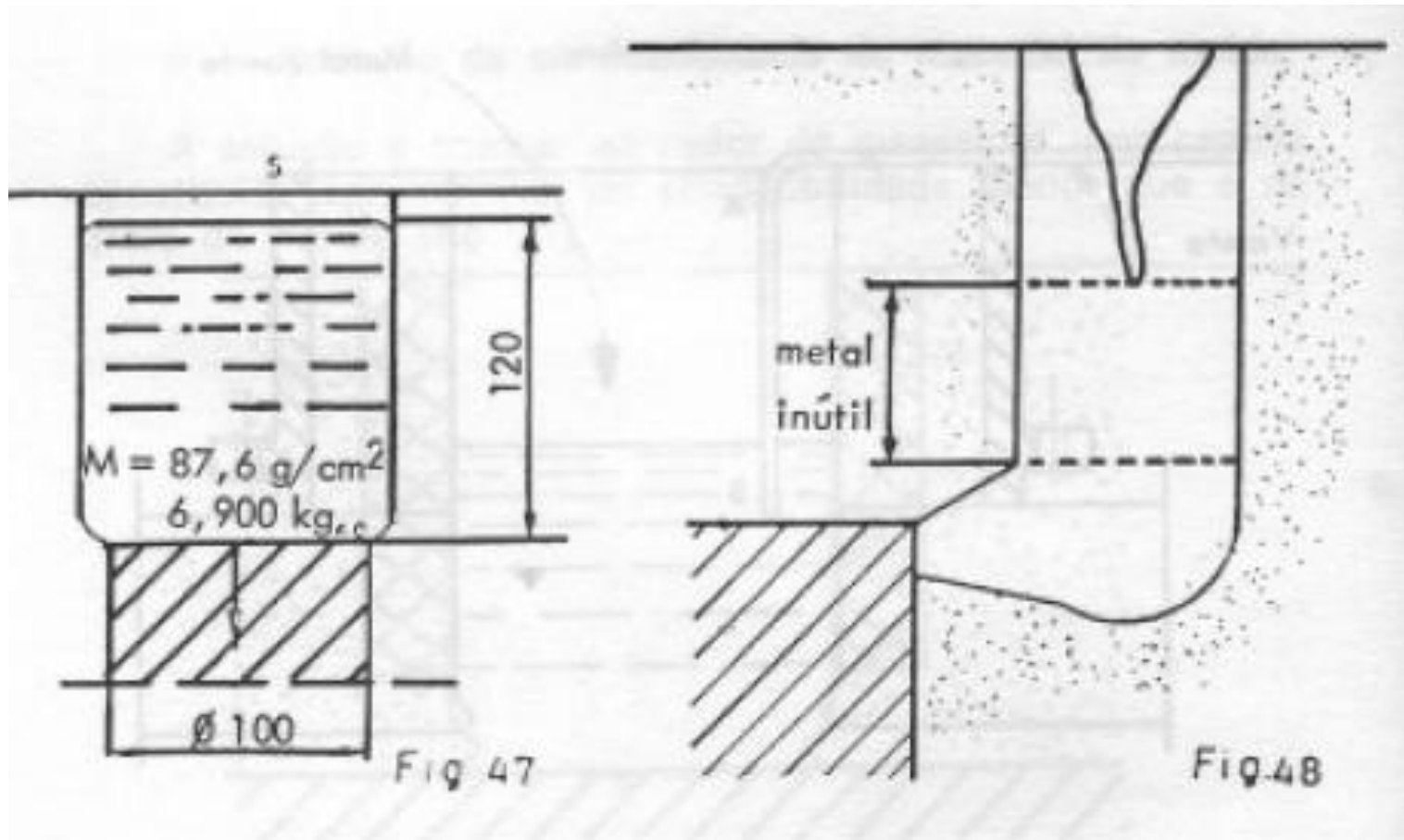
O volume do massalote deve compensar a redução do volume de contração da peça.



Funções dos massalotes

- Os massalotes devem satisfazer a 5 condições básicas:
 - estar localizado junto à parte da peça que solidifica por último
 - solidificar após a solidificação da peça
 - conter massa suficiente de metal líquido para compensar a contração da peça
 - **exercer pressão durante a solidificação da peça suficiente para vencer resistências como entrelaçamento de dendritas, viscosidade da região pastosa, atrito, facilitando a penetração do metal líquido nos rechupes em formação**
 - ter a menor massa possível sem perder sua eficácia, visando a redução de custos do processo de fundição

Funções dos massalotes



Funções dos massalotes

- Os massalotes devem satisfazer a 5 condições básicas:
 - estar localizado junto à parte da peça que solidifica por último
 - solidificar após a solidificação da peça
 - conter massa suficiente de metal líquido para compensar a contração da peça
 - exercer pressão durante a solidificação da peça suficiente para vencer resistências como entrelaçamento de dendritas, viscosidade da região pastosa, atrito, facilitando a penetração do metal líquido nos rechupes em formação
 - **ter a menor massa possível sem perder sua eficácia, visando a redução de custos do processo de fundição**

Funções dos massalotes

Todo metal contido nos massalotes e canais de distribuição impactam no custo do processo de fundição e devem ser minimizados.

Avalia-se a eficiência do sistema de massalotes através do cálculo do rendimento metálico:

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{massa do sistema de massalotes}}{\text{massa da peça}}$$