

LIGAS DE ALUMÍNIO FUNDIDAS

NOMENCLATURA DAS LIGAS FUNDIDAS SEGUNDO A ANSI (Aluminum Association)

- 1xx.x - Alumínio não ligado (comercialmente puro)
 - 2xx.x - Ligas contendo Cu como elemento de liga principal
 - 3xx.x - Ligas contendo Si como elemento de liga principal e adições de Mg ou Cu. As ligas da série 3xx são empregadas em 90% dos componentes fundidos.
 - 4xx.x - Ligas contendo Si como elemento de liga principal
 - 5xx.x - Ligas contendo Mg como elemento de liga principal
 - 6xx.x - não utilizada
 - 7xx.x - Ligas contendo Zn como elemento de liga principal, também sendo especificados outros elementos como Cu, Mg, Cr, Mn ou uma combinação destes)
 - 8xx.x - Ligas contendo Sn como elemento de liga principal
 - 9xx.x - não utilizada
- Série 1xx.x: o segundo e o terceiro dígitos indicam o teor de Alumínio acima de 99%. O último dígito (à direita do ponto decimal) indica a forma do produto:
 - 0 - indica peças fundidas (por exemplo, rotores para motores elétricos)
 - 1 - indica lingotes (barras para refusão)
 - Série 2xx.x à 8xx.x : o segundo e terceiro dígitos não possuem significado numérico, apenas identificam as várias ligas no grupo. O último dígito indica a forma do produto:
 - 0 - indica peças fundidas
 - 1 - indica lingotes convencionais
 - 2 - indica lingotes com faixas de composições mais restritas que aquelas dos lingotes convencionais
- Ligas que apresentam modificações na composição nominal são identificadas por letra maiúscula antes da identificação numérica.

As ligas de alumínio para a fundição são as mais versáteis de todas as ligas empregadas em fundição. Suas principais características de fundição são:

- baixa viscosidade, o que facilita o preenchimento de seções finas;
- baixa temperatura de fusão, possibilitando o emprego de moldes metálicos;
- elevado coeficiente de transferência de calor, possibilitando a realização de ciclos de fundição curtos;
- somente o hidrogênio apresenta solubilidade significativa em ligas de alumínio e seu teor pode ser controlado pelos processos de desgaseificação;
- a maior parte das ligas de alumínio não apresenta tendências ao fenômeno de trinca a quente e
- são ligas que não apresentam interações ou reações do tipo metal-molde e conseqüentemente, apresentam bom acabamento superficial após a fundição.

COMPOSIÇÃO NOMINAL DE ALGUMAS LIGAS DE ALUMÍNIO FUNDIDAS

Designação AA	Composição química [%]					Processo de fundição ¹
	Cu	Mg	Mn	Si	Outros	
201.0	4,6	0,35	0,35	-	0,7 Ag; 0,25 Ti	S
206.0	4,6	0,25	0,35	0,10	0,22 Ti; 0,15 Fe	S; P
A206.0	4,6	0,25	0,35	0,05	0,22 Ti; 0,10 Fe	S; P
208.0	4,0	-	-	3,0	-	S
242.0	4,0	1,5	-	-	2,0 Ni	S; P
295.0	4,5	-	-	0,8	-	S
296.0	4,5	-	-	2,5	-	P
308.0	4,5	-	-	5,5	-	S; P
319.0	3,5	-	-	6,0	-	S; P
336.0	1,0	1,0	-	12,0	2,5 Ni	P
354.0	1,8	0,50	-	9,0	-	P
355.0	1,2	0,50	0,50	5,0	0,6 Fe; 0,35 Zn	S; P
C355.0	1,2	0,50	0,10	5,0	0,20 Fe; 0,10 Zn	S; P
356.0	0,25 ²	0,32	0,35	7,0	0,6 Fe; 0,35 Zn	S; P
A356.0	0,20	0,35	0,10	7,0	0,20 Fe; 0,10 Zn	S; P
357.0	-	0,50	-	7,0	-	S; P
A357.0	-	0,60	-	7,0	0,15 Ti ; 0,005 Be	S; P
359.0	-	0,60	-	9,0	-	D
360.0	-	0,50	-	9,5	2,0 Fe	D
A360.0	-	0,50	-	9,5	1,3 Fe	D
380.0	3,5	-	-	8,5	2,0 Fe	D
A380.0	3,5	-	-	8,5	1,3 Fe	D
383.0	2,5	-	-	10,5	-	D
384.0	3,8	-	-	11,2	3,0 Zn	D
A384.0	3,8	-	-	11,2	1,0 Zn	D
390.0	4,5	0,6	-	17,0	1,3 Zn	D
A390.0	4,5	0,6	-	17,0	0,5 Zn	S; P
413.0	-	-	-	12,0	2,0 Zn	D
A413.0	-	-	-	12,0	1,3 Zn	D
443.0	0,6	-	-	5,2	-	S
A443.0	0,30	-	-	5,2	-	S
B443.0	0,15	-	-	5,2	-	S; P
C443.0	0,6	-	-	5,2	2,0 Fe	D
514.0	-	4,0	-	-	-	S
518.0	-	8,0	-	-	-	D
520.0	-	10,0	-	-	-	S
535.0	-	6,8	0,18	-	0,18 Ti	S
A535.0	-	7,0	0,18	-	-	S
B535.0	-	7,0	-	-	0,18 Ti	S
712.0	-	0,6	-	-	5,8 Zn; 0,5 Cr; 0,20 Ti	S; P
713.0	0,7	0,35	-	-	7,5 Zn ; 0,7 Cu	S; P
771.0	-	0,90	-	-	7,0 Zn; 0,13 Cr; 0,15 Ti	S
850.0	1,0	-	-	-	6,2 Sn; 1,0 Ni	S; P

1- S = fundição em areia; P = fundição em molde permanente (coquilha por gravidade ou baixa pressão); D = fundição por alta pressão

2- teor máximo permitido pela Aluminum Association - AA

De uma forma genérica podemos destacar as principais características de cada uma das famílias das ligas de alumínio fundidas, a saber:

Ligas Al-Cu (série 200)

As ligas Al-Cu caracterizam-se pela elevada resistência mecânica e boa usinabilidade, apresentando, de uma maneira geral, baixa resistência à corrosão atmosférica e grande tendência à formação de microporosidades. Suas aplicações típicas são: peças estruturais, carcaças e pistões para motores diesel.

Ligas Al-Si (série 300)

São as ligas de alumínio que apresentam as melhores características de fundição, motivo pelo qual cerca de 90% das peças fundidas em alumínio pertencerem à série 300. As ligas binárias apresentam elevada resistência à corrosão, boa soldabilidade, mas são de usinagem difícil.

Adições de Cu às ligas Al-Si melhoram a usinabilidade e aumentam a resistência mecânica (com redução da ductilidade). Adições de Mg tornam as ligas endurecíveis por meio de tratamentos térmicos, elevando sua resistência mecânica.

As ligas com menores teores de Si (5 a 7% Si) são normalmente empregadas para a fundição em moldes de areia, enquanto que ligas de maior teor (9 a 13% Si) são normalmente utilizadas em moldes permanentes ou sob-pressão.

As ligas hipereutéticas destacam-se por sua elevada resistência ao desgaste, baixo coeficiente de dilatação térmica e elevada condutividade térmica.

As principais aplicações envolvem peças de uso geral, coletores de admissão, cabeçotes e blocos de motor, pistões e rodas automotivas, peças estruturais para a indústria aeroespacial, bombas, carcaças e componentes de suspensão.

Ligas Al-Mg (série 500)

Caracterizam-se pela elevada resistência à corrosão e excelente usinabilidade, apresentando, por outro lado, moderada tendência a defeitos de fundição e tendência à oxidação. Após tratamento térmico desenvolvem resistência mecânica elevada. Suas aplicações típicas envolvem: peças estruturais para a indústria química, de alimentos e naval.

Ligas Al-Zn (série 700)

São muito similares às ligas Al-Mg, principalmente quando apresentam Mg em sua composição química. Suas características de fundição são consideradas moderadas, devido a sua tendência à oxidação.

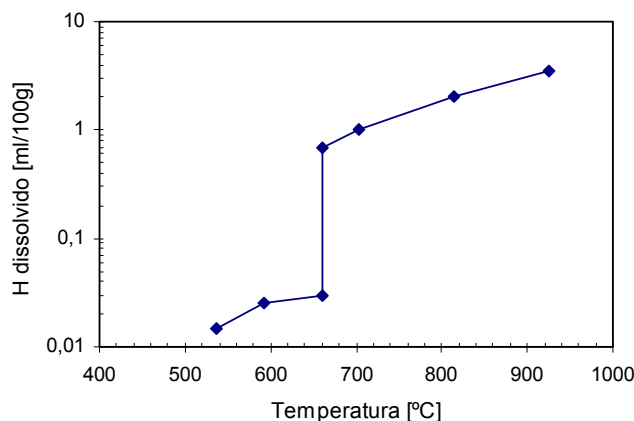
Ligas Al-Sn (série 800)

Apresentam boa usinabilidade e boas propriedades anti-fricção. Suas aplicações típicas envolvem mancais, buchas e bronzinas.

TRATAMENTOS DE METAL LÍQUIDO APLICÁVEIS ÀS LIGAS DE ALUMÍNIO

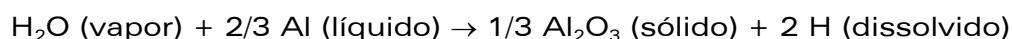
DESGASEIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

De uma maneira geral, os metais no estado líquido tendem a absorver gases da atmosfera. As ligas de alumínio apresentam grande solubilidade de hidrogênio no estado líquido (acima de 660°C). Entretanto, na solidificação, a solubilidade de H diminui drasticamente, conforme mostrado na figura abaixo.



Em decorrência deste fato, durante a solidificação, cerca de 95% do hidrogênio é segregado para as últimas porções de líquido, atingindo teores elevados e promovendo a formação de porosidades em regiões interdendríticas. Tais porosidades têm um efeito deletério sobre as propriedades mecânicas, notadamente sobre a ductilidade e a resistência à fadiga.

A absorção de hidrogênio pelo metal líquido ocorre através da redução do vapor de água, conforme a reação:



A eliminação de porosidades decorrentes da absorção de H pode ser obtida de três maneiras:

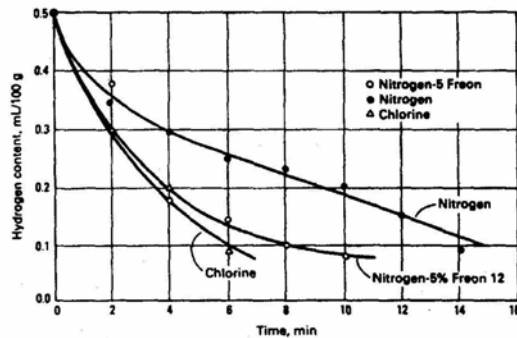
- reduzir a absorção de hidrogênio durante as etapas de fusão, manutenção e vazamento;
- dificultar a nucleação das porosidades e
- promover a degaseificação da liga antes do vazamento.

O processo de degaseificação é o mais utilizado e é tradicionalmente realizado por três processos:

- 1- degaseificação à vácuo;
- 2- borbulhamento de gás ativo, normalmente cloro, adicionado por meio de pastilhas de hexacloretano ou por um tubo perfurado (cloro gasoso) e
- 3- borbulhamento de gás neutro (Ar ou N₂) através de tubo perfurado com ou sem plug poroso ou ainda com tubo perfurado e rotor de grafita.

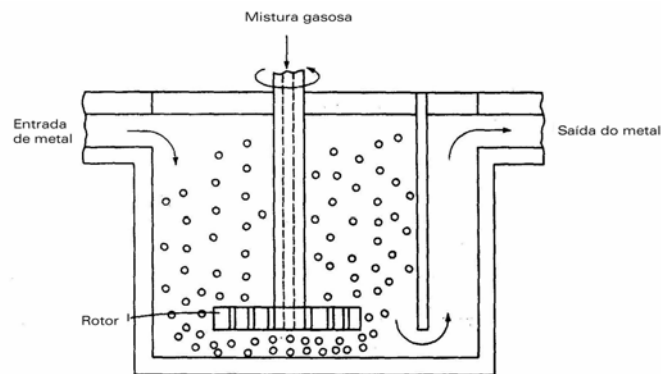
Os dois primeiros processos apresentam alta eficiência na remoção do H dissolvido. Entretanto, apresentam como desvantagem, respectivamente, o custo do equipamento e a toxidez associada à corrosividade do gás cloro.

O borbulhamento de gás neutro através de lanças de ponta porosa apresenta como vantagem o baixo custo do aparato, mais exige um tempo de tratamento superior, conforme ilustra a figura abaixo.

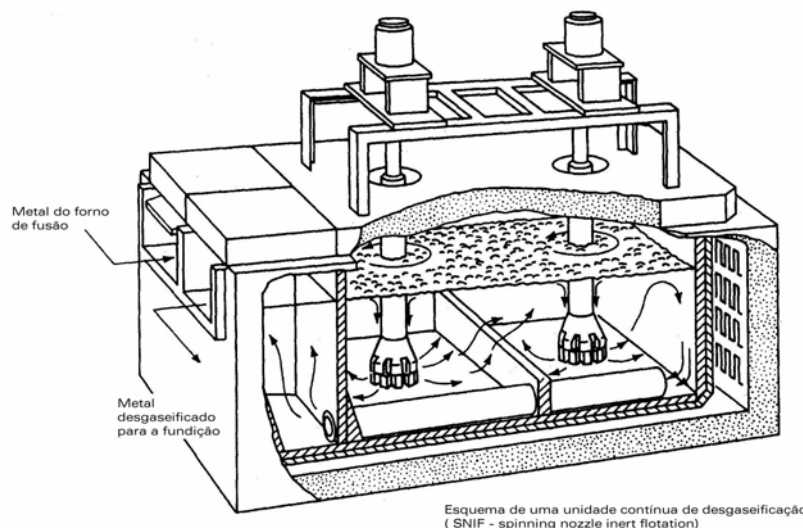


Redução do teor de H dissolvido no banho com o tempo de degaseificação.

Mais recentemente, como o entendimento das condições termodinâmicas e cinéticas que governam o processo de degaseificação, foi possível o desenvolvimento da injeção de gás inerte por meio de rotor de grafita. Neste processo, o gás é "fragmentado" pelo movimento rotativo do rotor gerando um número elevado número de bolhas. Como a reação de degaseificação depende, fundamentalmente, da área total das bolhas do gás, quanto maior a quantidade e menor o tamanho das bolhas, maior é a cinética de degaseificação.



Esquema de uma unidade de degaseificação contínua (rotor).



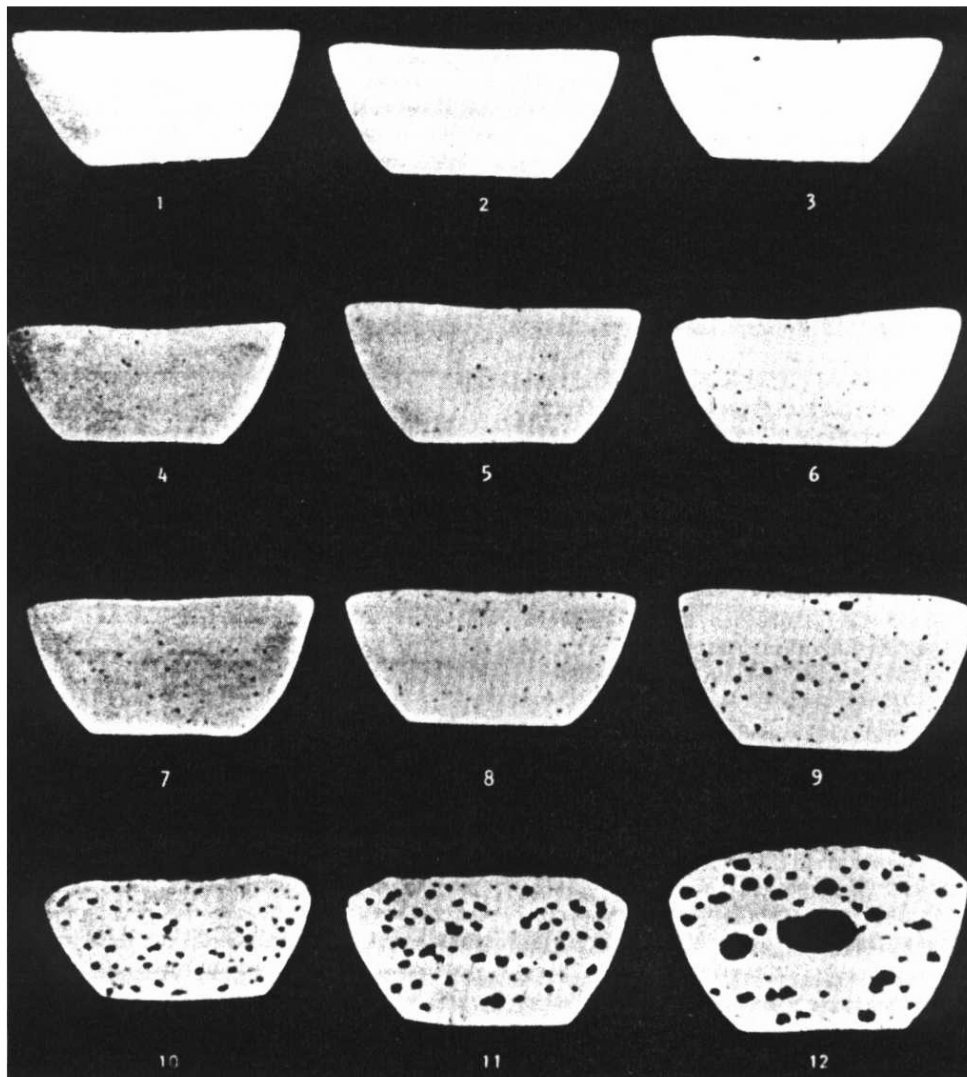
Esquema de uma unidade contínua de degaseificação (SNIF - spinning nozzle inert flotation)

Outra vantagem indireta dos processos de degaseificação é a flotação de óxidos (alumina) para a superfície do banho, que posteriormente são removidos mecanicamente (por meio de escumadeiras).

Os controles realizados sobre o teor de hidrogênio dissolvido nas ligas de alumínio são:

- 1- controle direto do teor de hidrogênio no banho líquido através de sondas, como no caso do equipamento TELEGÁS;
- 2- avaliação indireta por meio da medição de densidade ou exame visual de amostras solidificadas sob vácuo e
- 3- avaliação indireta do hidrogênio dissolvido no banho pela observação do momento em que surge a primeira bolha em um corpo-de-prova solidificado sob vácuo.

A figura abaixo apresenta amostras solidificadas sob vácuo contendo diferentes teores de H dissolvidos.



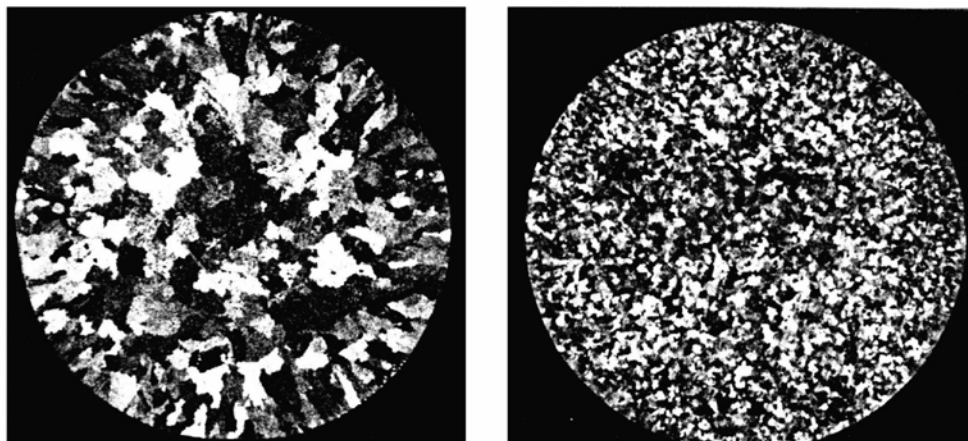
Amostras obtidas sob pressão reduzida empregadas na avaliação da quantidade de hidrogênio dissolvido em banhos de alumínio. As intensidades de 1 a 12 representam teores crescentes de H.

REFINO DE GRÃO EM LIGAS DE ALUMÍNIO FUNDIDAS

O tamanho de grão das ligas de alumínio fundidas depende da quantidade de núcleos de grãos no líquido e da velocidade de solidificação da liga. Assim, a diminuição do tamanho de grão (refino de grão) nestas ligas só é possível com o aumento do número de núcleos no líquido ou com o aumento da velocidade de resfriamento.

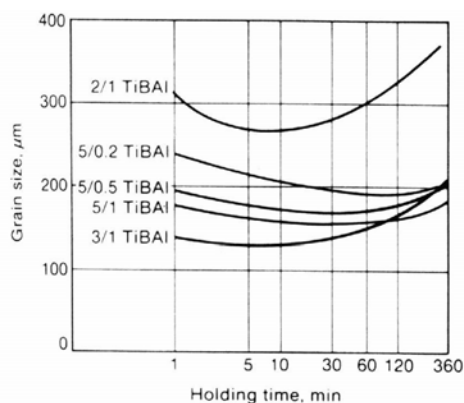
No caso de peças resfriadas lentamente (molde de areia) ou peças de grandes dimensões, o refino de grão é realizado com a adição de pós à base de Al-Ti ou Al-Ti-B na liga líquida. A adição destes refinadores provoca a formação de partículas sólidas dispersas de Al_3Ti que atuam como núcleos para os primeiros grãos decorrentes da solidificação.

O refino de grão tem como objetivo principal o de reduzir os tamanhos das dendritas (grão da fase α pró-eutética), melhorando as condições de alimentação (e assim, a sanidade e estanquidade das peças fundidas), as propriedades mecânicas (limites de escoamento e de resistência), bem como a tendência a formação de trincas à quente.

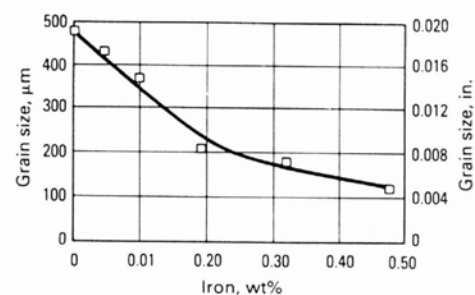


(a) (b)
Efeito da adição do refinador de grão Al-5Ti-1B. (a) antes da adição (b) após a adição

O efeito máximo dos refinadores é obtido após 5 a 10 minutos da adição no banho. Seu efeito não é permanente, ou seja, após 45 minutos o efeito diminui, sendo necessárias novas adições ou agitações para reativar as condições metalúrgicas do banho.



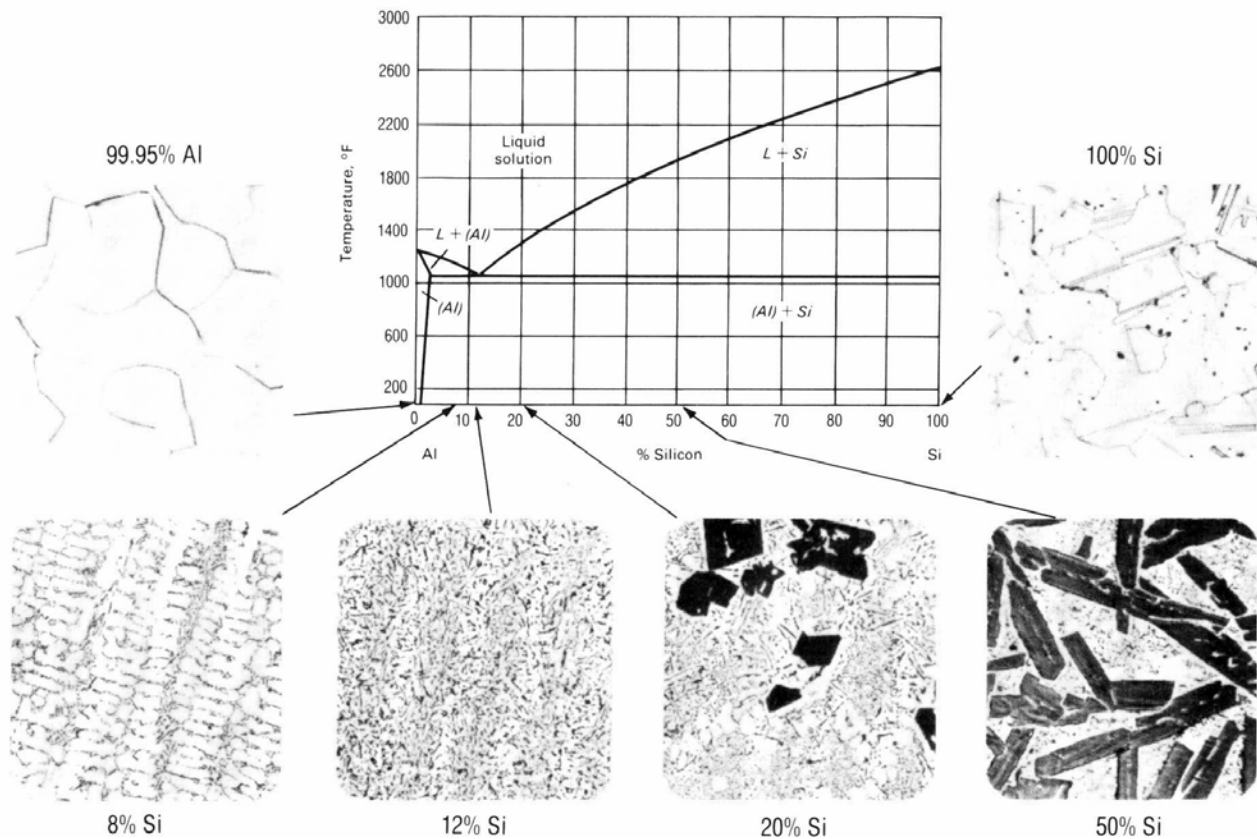
Efeito do tempo de permanência após a adição no tamanho de grão de amostras da liga 3004



Efeito do teor de Fe no alumínio puro sobre o refino de grão com Al-5Ti-1B

MODIFICAÇÃO DE LIGAS Al-Si FUNDIDAS

A grande maioria dos componentes fundidos em ligas de alumínio emprega ligas do sistema Al-Si. Ocorre que a microestrutura bruta de fundição destas ligas apresenta partículas de Si com morfologia acicular, que diminui a ductilidade destas.



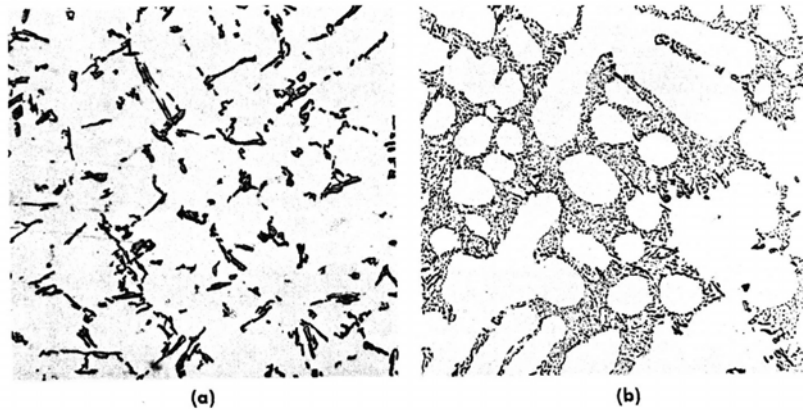
A modificação consiste em um tratamento do banho de alumínio silício pela adição de agentes modificadores da morfologia das partículas de Si. Os agentes modificadores mais empregados são: o Na (Sódio), o Sr (estrôncio) e o Sb (antimônio).

Adições destes elementos (entre 0,005 e 0,02% em peso) promovem fortes alterações no crescimento da fase β (silício) do eutético: a fase β passa a exibir uma morfologia mais refinada, aumentando a ductilidade das ligas Al-Si fundidas.

Independente do tratamento de modificação, elevadas velocidades de resfriamento, como as obtidas em moldes metálicos, contribuem para refinar o tamanho dos grãos e a estrutura do próprio eutético, como ocorre quimicamente.

A modificação com estrôncio é realizada por meio da adição de estrôncio (Sr) metálico ou na forma de anteliga Al-Sr. Normalmente, as adições são da ordem de 0,01% de Sr e exige-se um tempo de incubação de cerca de 15 minutos para banhos com pouca agitação.

A modificação com sódio é feita por meio de adições de sódio (Na) metálico ou de fluxos contendo este elemento. O sódio é um modificador mais eficiente que o estrôncio, promovendo melhores graus de modificação. Entretanto, devido à sua maior tendência à vaporização, o seu efeito modificador perde-se com mais rapidez que o Sr. Em banhos modificados com Na, o efeito modificador permanece por cerca de 30 minutos. No caso de Sr o efeito permanece por mais de 2 horas. Outro ponto negativo do Na é o ataque aos cadinhos de fusão.

Efeito da modificação sobre a microestrutura da liga 356 fundida em areia

Ambos os corpos-de-prova foram polidos e atacados com HF 0,5% e são apresentados com aumento de 100x. A microestrutura consiste de dendritas de alumínio e o eutético Al-Si.
 (a) amostra fundida em areia se modificação. (b) amostra modificada pela adição de 0,025% de Na no banho. Os constituintes são os mesmos, entretanto as partículas de Si do eutético na amostra modificada (b) são menores e mais arredondadas que na amostra (a), tornando a liga mais dúctil e tenaz.



Diversos condições de modificação do eutético Al-Si, variando da condição não-modificada (A) até a plenamente modificada (F)

O efeito da modificação nas propriedades mecânicas em ligas Al-Si no estado bruto de fundição é apresentada na tabela abaixo:

Estrutura do eutético	Liga: Al- 7% Si -0,3% Mg (356)		Liga: Al - 11%Si	
	Limite de resistência [MPa]	Alongamento [%]	Limite de resistência [MPa]	Alongamento [%]
Acicular (sem modificação)	180	7	150	6
Fibrosa (modificada)	200	16	170	18

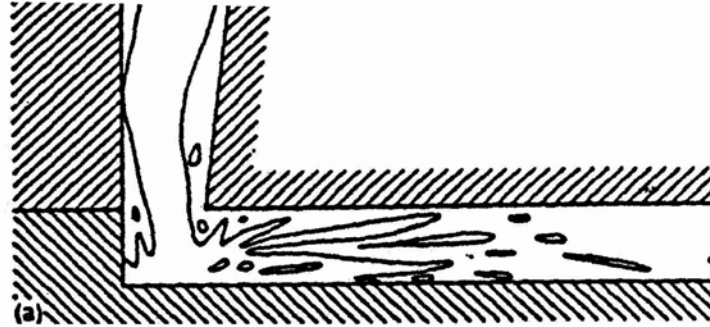
O efeito do tratamento de modificação seguido de tratamento térmico (solubilização e envelhecimento) na liga 356 fundida em coquilha e fundida em molde de areia é apresentado na tabela abaixo:

Estrutura do eutético	Liga: Al-7% Si-0,3% Mg (356) Fundida em molde permanente		Liga: Al-7% Si-0,3% Mg (356) Fundida em molde de areia	
	Limite de resistência [MPa]	Alongamento [%]	Limite de resistência [MPa]	Alongamento [%]
Acicular (sem modificação)	290	12	275	2,5
Fibrosa (modificada)	290	17	280	6

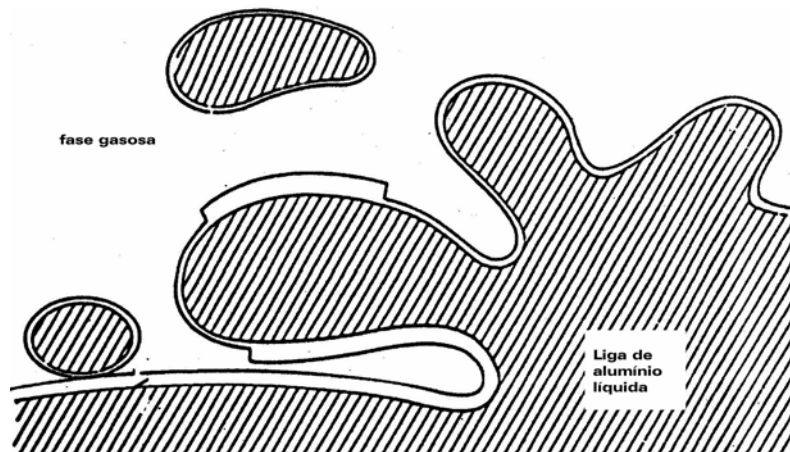
Verifica-se que o tratamento de modificação afeta diretamente a ductilidade da liga, possuindo pouco efeito sobre a resistência a tração.

INCLUSÕES DE ÓXIDOS

As ligas de alumínio apresentam como característica a formação de uma fina e frágil camada de óxido que recobre os banhos líquidos. A composição destes óxidos é a base de alumina (Al_2O_3) e, conseqüentemente, eles apresentam elevada temperatura de fusão e são levemente mais densos que o alumínio líquido. Assim, o escoamento turbulento do alumínio líquido promove a formação e/ou a incorporação destes óxidos no banho gerando defeitos no produto fundido .



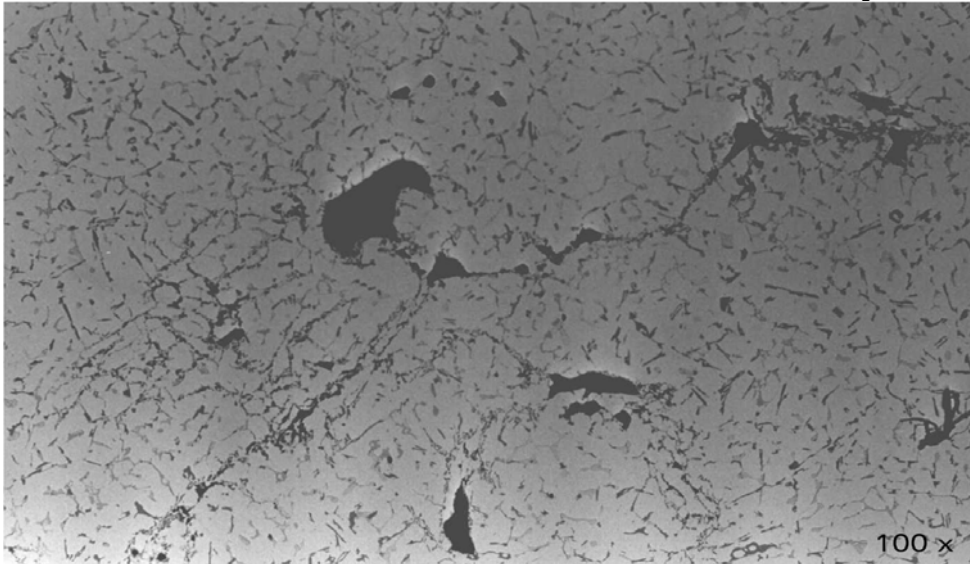
Turbulência do metal líquido durante o preenchimento de uma peça fundida.



Detalhe esquemático da formação de filmes de óxidos durante o escoamento turbulento de uma liga de alumínio



(a) – inclusões de óxidos associada à bolhas de ar em roda automotiva fabricada (processo de baixa pressão) com a liga A356.



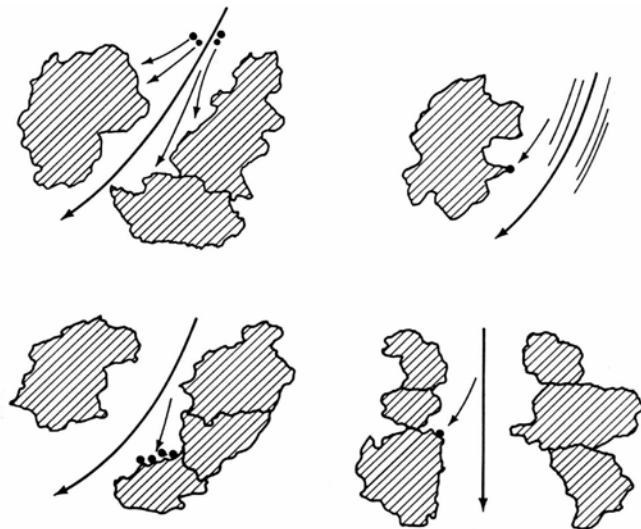
(b) – inclusões de óxidos associadas à bolhas de ar em amostra de coletor de admissão fundido em areia com a liga 357.

Mais crítico que a operação de vazamento, são as operações de transferência forno/panela ou panela/molde que são tipicamente turbulentas. Para estas operações são indicados os fornos vazadores ou para vazamento em conchas, o emprego de conchas com rasgo lateral que diminui a quebra da camada de óxidos.

Outra técnica, muito difundida é o uso de filtros para a retenção mecânica dos óxidos e fragmentos exógenos (fragmentos provenientes dos fornos, panelas, ou moldes).

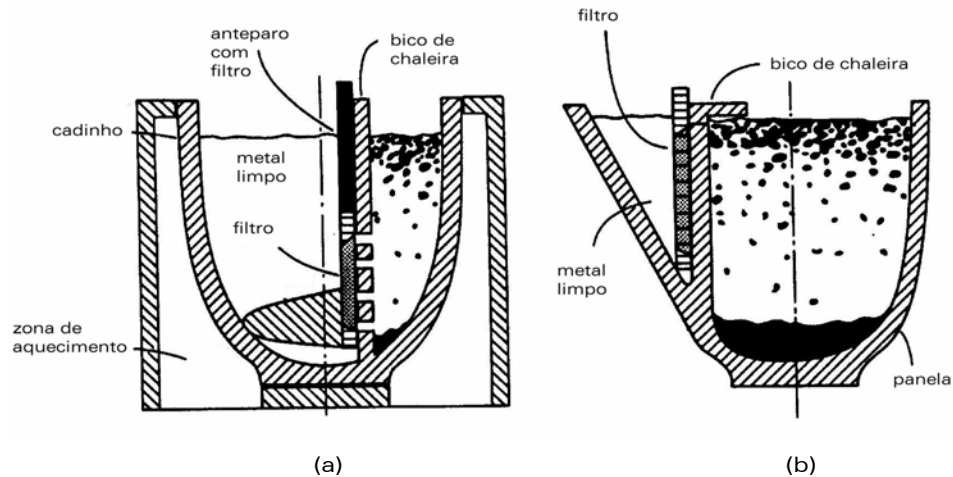


Estrutura de um filtro cerâmico do tipo espuma

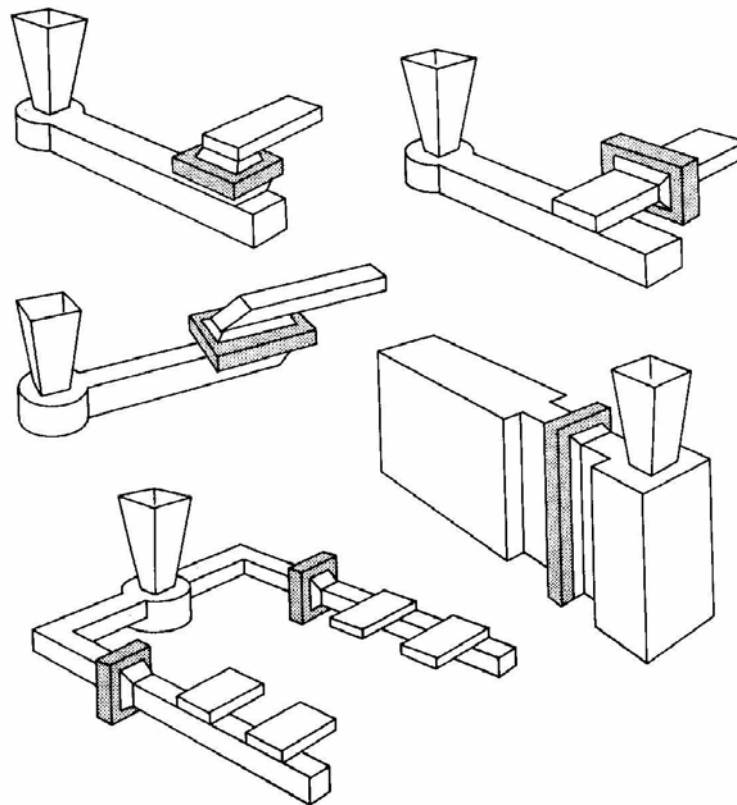


Transporte e captura de óxido durante a filtração

O uso de filtros cerâmicos é aplicado tanto em panelas de transferência, quanto em sistemas de enchimento de moldes dos componentes.



A figura acima apresenta o uso de filtros cerâmicos do tipo espuma em cadinhos de fusão (a) e painéis de transferência (b).



Exemplos de sistemas de enchimento com o posicionamento de filtros cerâmicos.

A figura acima apresenta o emprego de filtros cerâmicos em projetos de enchimento de componentes fundidos com ligas alumínio.

O correto dimensionamento do sistema de enchimento (projeto dos canais de descida e de ataque) evitando a turbulência do líquido durante o preenchimento da cavidade do molde diminui significativamente a ocorrência de defeitos como filmes de óxidos e bolhas de ar provocadas pelo encontro de frentes de solidificação (gota fria).

PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

As ligas de alumínio fundidas diferem das ligas conformadas pela ausência de qualquer tipo de conformação mecânica em seu processamento, ou seja, são obtidas diretamente do líquido por meio de processos de fundição. Do ponto de vista de fundição, as ligas de alumínio caracterizam-se pela baixa temperatura de fusão. Por um outro lado, esta característica permite uma grande flexibilidade quanto aos tipos de moldes utilizados já que as solicitações térmicas são reduzidas. São comuns os moldes de areia (a verde ou aglomerados com resinas ou silicatos), moldes metálicos (fabricados em aços ou ferros fundidos), moldes de gesso, moldes de materiais cerâmicos (fundição de precisão e processo “shaw”) etc.

Os moldes ditos permanentes, fabricados em materiais metálicos, são os preferidos para grandes produções por minimizarem os custos de moldagem e permitirem a obtenção de excelente acabamento superficial. Entretanto, o custo do ferramental é elevado e torna proibitiva sua aplicação em séries inferiores a 10000 peças.

Para séries menores, os processos de areia, gesso e de moldes cerâmicos são mais indicados. Entretanto, nestes processos, a menor velocidade de resfriamento das ligas favorece o desenvolvimento de microestruturas grosseiras e o aumento do volume de microporosidades, prejudicando a qualidade metalúrgica dos componentes.

Além do material de moldagem, é importante diferenciar os processos de fundição pela forma de vazamento do metal, podendo ser:

- por gravidade;
- sob pressão ou
- contra a gravidade com baixa pressão.

Em relação a este aspecto, o vazamento por gravidade e, principalmente, o feito sob pressão impõe turbulência ao fluxo de metal, gerando e incorporando inclusões de óxidos. Nos processos por gravidade, há formas de minimizar tais gerações com o uso de canais de descida projetados especialmente para reduzir a turbulência e reduzir a velocidade do fluxo, uso de filtros cerâmicos ou de moldes basculantes.

As máquinas de baixa pressão e processos especiais como o “Cosworth” apresentam vantagens neste aspecto, por permitirem um controle no fluxo de enchimento das peças.

Outro ponto importante envolvendo os processos de fundição é a aplicação de pressão durante a solidificação que garante melhores condições de alimentação, reduzindo a formação de microporosidades. Isto ocorre em máquinas de fundição sob pressão, baixa pressão e processos especiais como o “Cosworth” e o “Castylral”.

Fundição em moldes metálicos

Os moldes metálicos apresentam algumas vantagens sobre a fundição em moldes de areia. As principais são:

- melhor acabamento superficial,
- melhores tolerâncias dimensionais;
- permitem reduzir o sobre-metal de usinagem;
- melhor qualidade microestrutural (e mecânica) devido a maior velocidade de resfriamento ;
- menor necessidade de operações de limpeza e rebarbação dos fundidos.

PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

(fundição por injeção)

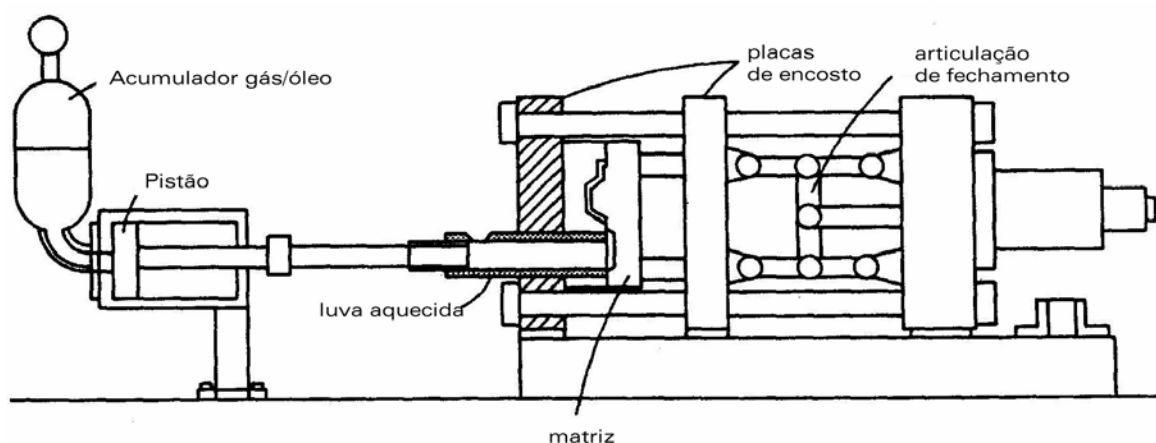
O processo de fundição sob pressão é o mais usado na produção de peças fundidas em alumínio. Como a velocidade de preenchimento é elevada, o processo permite a produção de peças de paredes finas, com geometria complexa e com dimensões próximas às finais. As máquinas de injeção mais comuns são do tipo câmara fria operando ao lado de um forno de espera, aquecido por meio de resistências elétricas. O sistema de vazamento (por meio de conchas) pode ser manual ou automatizado. A pressão de injeção é da ordem de 100 a 200 atmosferas (103 a 206 kgf/cm²)

Visando minimizar o desgaste das matrizes pelo alumínio, utilizam-se baixas temperaturas de fusão e elevados teores de Fe na liga. Em consequência disto, pode ocorrer a formação de fase ricas em ferro no estado sólido ("sludge") nos fornos de espera que tendem a decantar. A presença de Cr e ou Mn tendem a agravar o problema. Caso estas partículas de Fe (Al_5FeSi) penetrem na injetora as peças apresentaram fase duras na microestrutura, dificultando a usinagem.

Outra fonte de problemas na fundição sob pressão é o sistema de canais. Como são utilizadas altíssimas velocidades de vazamento, é inevitável a turbulência do fluxo metálico e conseqüente geração de inclusões de óxidos. Mais grave ainda é o projeto de canais em que as peças são preenchidas por canais mais finos que impedem a ação da pressão na alimentação das seções mais espessas, ou ainda canais que permitam o encontro de duas frentes de metal que reteriam bolsas de ar.

Devido as inclusões de óxidos e eventuais vazios de rechupes ou bolsas de ar, as peças produzidas por este processo não podem ser tratadas termicamente. Além disso, sua utilização em componentes de alta resistência mecânica não é recomendada.

As ligas mais utilizadas são a 380 e a 413, normalmente sem nenhum tratamento de banho. O teor de Fe encontra-se entre 0,8 e 1,5% como forma de reduzir os problemas de aderência de metal e erosão das matrizes.



Esquema de uma máquina de injeção de alta pressão do tipo câmara fria.

PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM COQUILHA POR GRAVIDADE

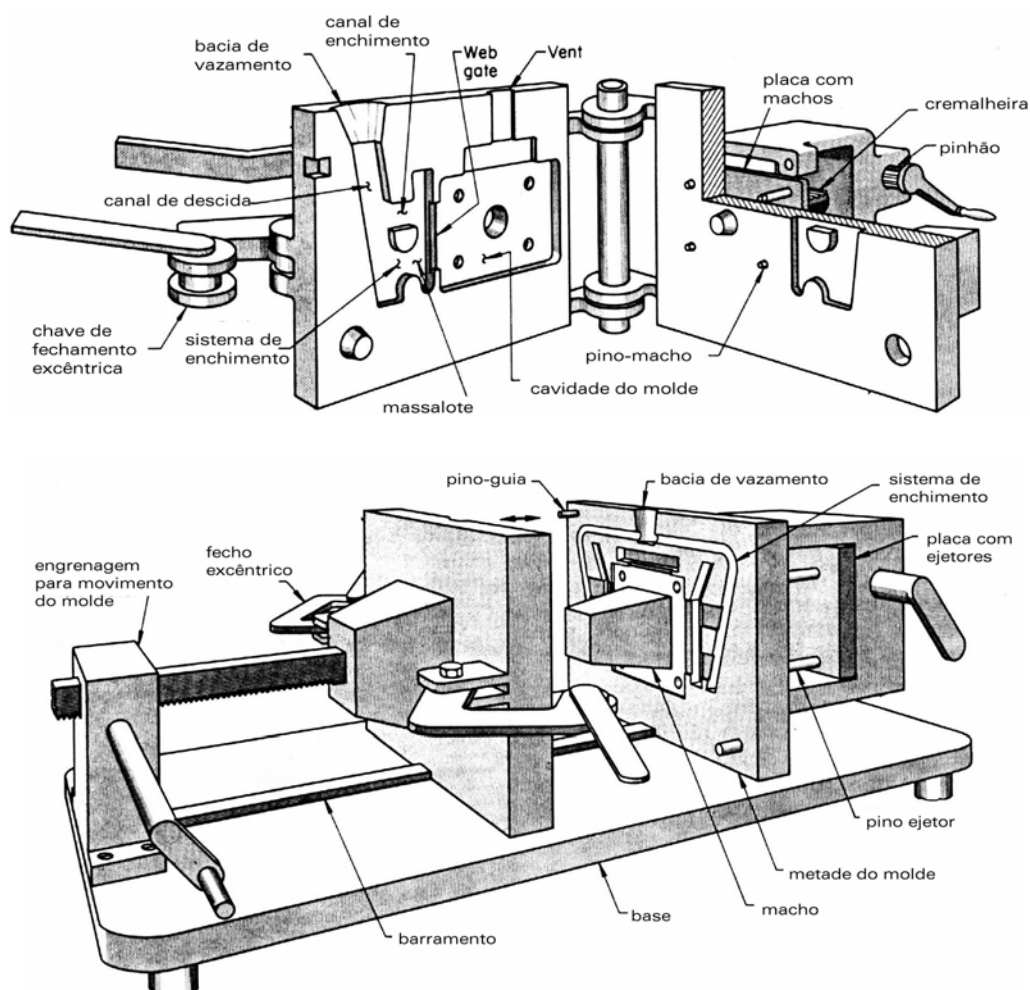
Este é o segundo processo na produção de componentes seriados. As máquinas coquilhadeiras apresentam um custo bastante inferior às máquinas de injeção, além de serem mais versáteis. O processo em coquilha permite o uso de machos metálicos (acionados por pistões ou cremalheiras) ou machos em areia (como no caso de cabeçotes de motor).

O processo de vazamento por gravidade introduz dois problemas: a turbulência no canal de descida e falta de pressão para garantir a alimentação, particularmente em ligas de solidificação pastosa. A turbulência pode ser minimizada com o uso de coquilhadeiras basculantes (sistema Durville), projetos especiais de canais e com o uso de filtros.

A tendência à formação de porosidades pode ser diminuída com as seguintes medidas:

- no processo de modificação, não empregar sódio (Na) ou estrôncio (Sr) em ligas hipoeutéticas, o antimônio (Sb) é o mais recomendado;
- promover um refino de grão eficiente;
- empregar ligas com pequeno intervalo de solidificação e
- reduzir ao máximo o teor de hidrogênio dissolvido na liga.

As ligas mais usadas em coquilha são: 319, 355, 356, 359 360 380 e 413. Quando possível o teor de Fe é mantido elevado, entre 0,5 % e 1,0 %, exigindo o controle das fases à base de Fe com adições de Cr e Mn. Em aplicações de maior resistência mecânica o teor de Fe é mantido entre 0,2% ou 0,25%.



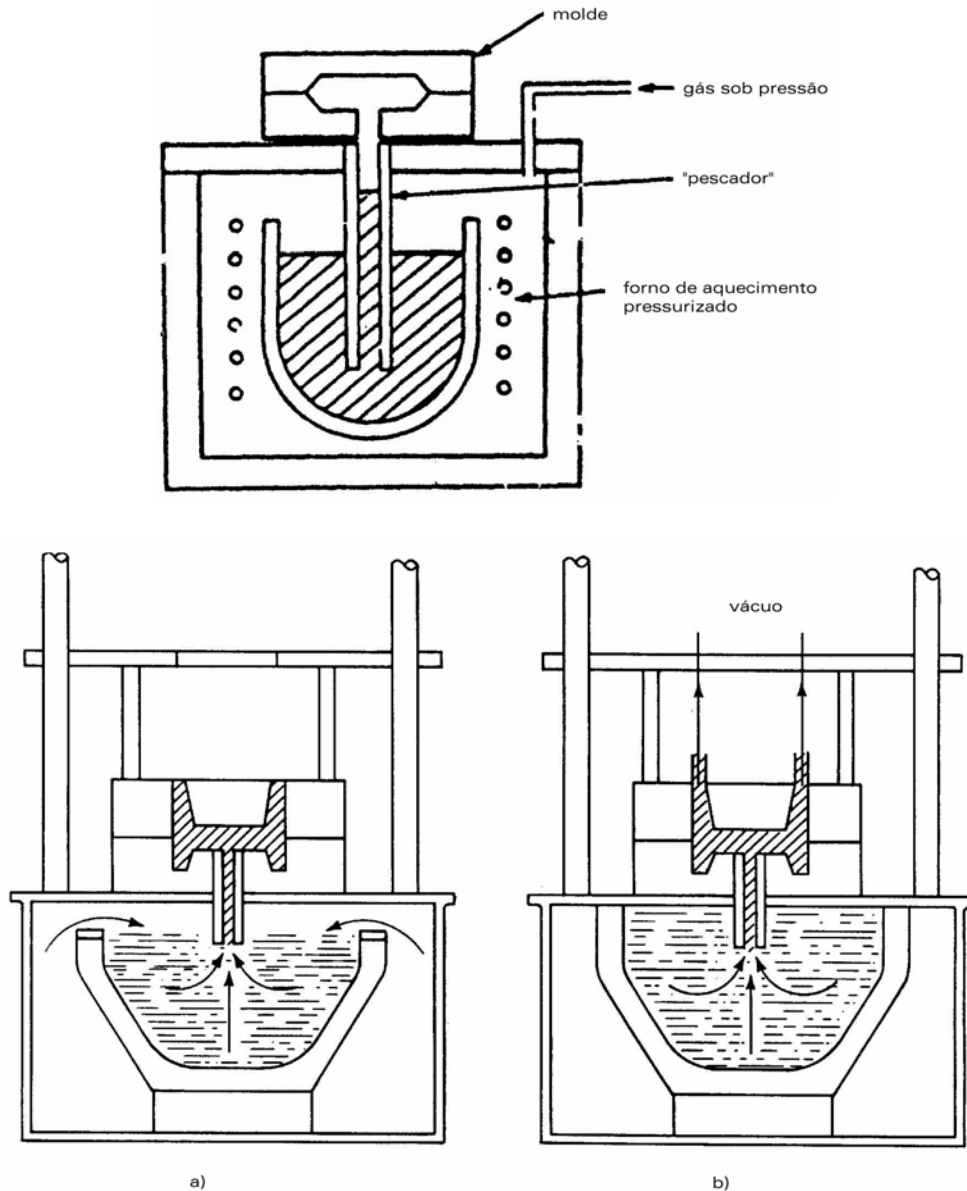
PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM BAIXA PRESSÃO

(coquilha em baixa pressão)

Este processo emprega coquilhas metálicas com vazamento por baixo, contra a gravidade, por meio de um tubo de alimentação ("pescador"). As pressões de $0,5 \text{ kgf/cm}^2$ a $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ são aplicadas por meio de ar comprimido, preferencialmente, contendo baixa umidade.

O processo da baixa pressão foi desenvolvido especialmente para a fabricação de rodas automotivas, principalmente devido à sua geometria. Hoje seu emprego expandiu-se para outros componentes automotivos (braços e bandejas de suspensão) ou aeroespaciais.

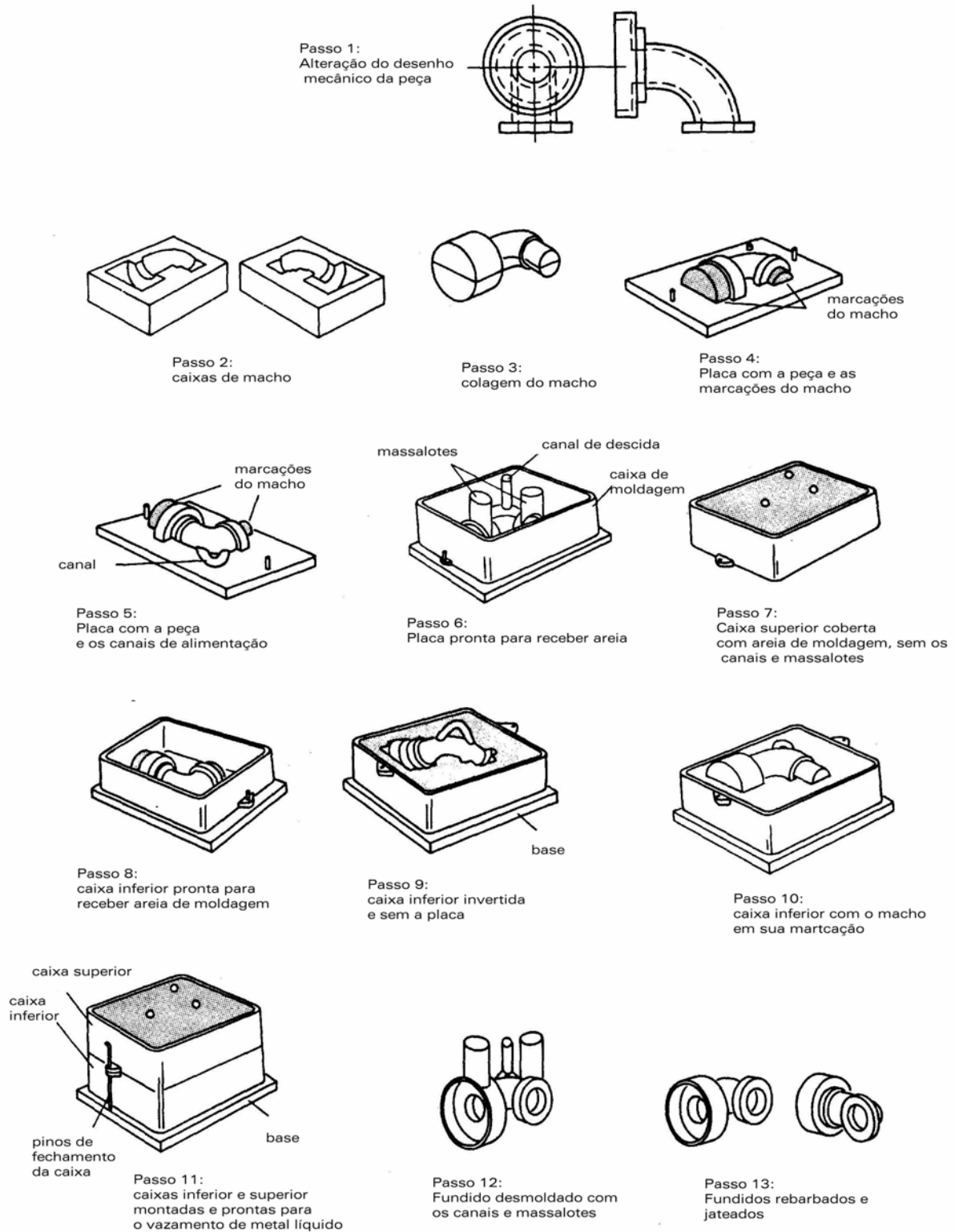
Na produção de rodas automotivas são utilizadas as ligas 356 e variantes das ligas 359 e 413. As duas primeiras, de composição hipoeutética são empregadas em máquinas de baixa pressão, enquanto que ligas com menor intervalo de solidificação (mais próximas do ponto eutético - 12%Si) são as mais comuns em coquilhas vazadas por gravidade.



Esquema de máquinas de baixa pressão: a) baixa pressão e b) preenchimento a vácuo

PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA

Os moldes são compostos por uma mistura de areia (sílica) e ligantes naturais (bentonita) ou resinas sintéticas.



PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO (PROCESSO DE CERA PERDIDA OU MICROFUSÃO)

O molde é composto por camadas sucessivas de lama cerâmica, normalmente à base de zirconita e sílica coloidal, e material refratário particulado (estruque).

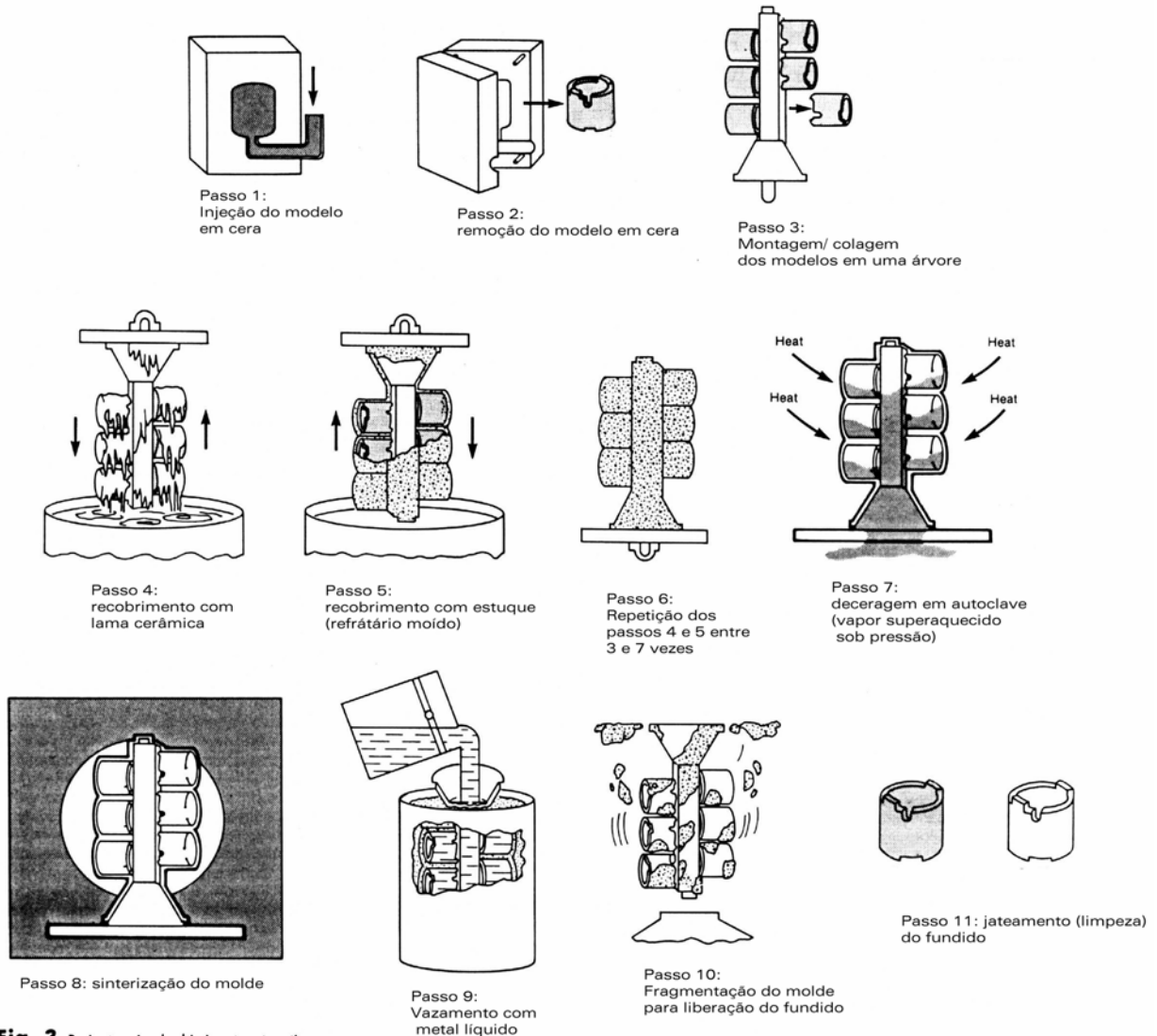
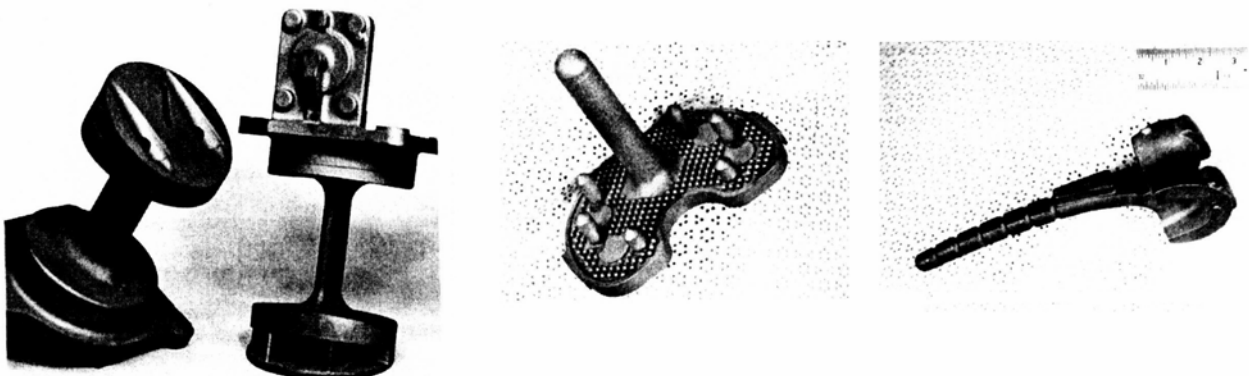


Fig. 3 Basic steps involved in investment casting



Lista de exercícios – ligas de alumínio fundidas

- 1- Quais os fatores que justificam o emprego de processos de fundição para a fabricação de componentes?
- 2- Sobre a modificação de ligas Al-Si:
 - a)- Qual é o objetivo do tratamento de modificação em ligas de Al-Si fundidas?
 - b)- Como este tratamento é realizado?
 - c)- É possível refinar a fase β (Si) sem o emprego de agentes modificadores?
- 3- Quais as técnicas empregadas para minimizar a ocorrência de defeitos decorrentes de filmes de óxidos em ligas de alumínio?
- 4- Sobre o tratamento de desgaseificação:
 - a)- Porque as ligas de alumínio são desgaseificadas?
 - b)- Como pode ser realizado este processo?
 - c)- Que tipo de defeito decorre da presença de hidrogênio dissolvido no metal.
- 5- Descrever a gênese dos defeitos os defeitos de rechupe, bolha de gás e filme de óxido?
- 6- Qual é o objetivo do refino de grão de ligas Al-Si fundidas e em que tipo de componente este tratamento é mais recomendado?
- 7- Deseja-se fabricar um lote de rodas automotivas. O forno de espera contém 100 kg da liga A356, sem nenhum tipo de tratamento, na temperatura de 740°C. O componente deve apresentar de elevada resistência mecânica associada à máxima ductilidade e resistência à fadiga. Quais os tratamentos de banho que devem ser realizados e a sua seqüência?