

VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE MOLDES  
DE AREIA CONGELADOS PARA A FUNDIÇÃO  
DE METAIS DE BAIXO PONTO DE FUSÃO .

003/85

*Cópia de acordo com  
o aprovado*

*Melina Robert*

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
SETOR DE FABRICAÇÃO

VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE MOLDES DE AREIA  
CONGELADOS PARA A FUNDIÇÃO DE METAIS DE BAIXO  
PONTO DE FUSÃO

FLORENCIO FONTECILLA ALCALDE

Orientadora: Prof. Dra. Maria H. Robert.

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia  
de Campinas - UNICAMP - como parte dos re-  
quisitos necessários para obtenção do título  
de MESTRE EM CIENCIAS.

- CAMPINAS 1985 -

**UNICAMP**  
**BIBLIOTECA CENTRAL**

A Soledad, María Isabel y Felipe,  
por todas las horas que robé de  
ellos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Prof. Dra. Maria Helena Robert, a orientação, dedicação e auxílio prestados para o desenvolvimento deste trabalho.

A Rita Helena, Aristides, Sr. Laerte, Wanderley e a todo o pessoal do Depto. de Eng. Mecânica da Unicamp, que auxiliaram nos trabalhos experimentais.

Aos colegas da IBM do Brasil, Armando, Edison José Marcos e M. Helena, pela sua cooperação nos trabalhos de fotografia e datilografia.

Agradeço ainda a Odovaldo R. Martins, da Fundação Romi, pela paciente colaboração nos trabalhos exp. no laboratório de areias.

## RESUMO

Neste trabalho foi verificada a viabilidade de confecção e utilização de moldes de areia aglomerada com água congelada para a fundição de lingotes de metais não ferrosos (Al e Pb). Para tanto foram obtidos moldes em diferentes condições de mistura (areia AFS 45-50 e areia AFS 90-100 contendo 2,4 e 6% de água) e diferentes temperaturas de congelamento (-50, -70, -90 e -110°C). Foram analisados os tempos de congelamento nas diferentes condições, resistência à tração e tempos de descongelamento ao ar e durante a solidificação do metal, nos moldes obtidos.

Os resultados mostram-se favoráveis em todos os aspectos analisados: confecção e operação fácil dos moldes, características de resistência superiores a outros processos convencionais, altos tempos de descongelamento ao ar e compatibilidade entre o tempo de descongelamento no vazamento e o tempo de solidificação do metal líquido neles contido.

Foram também verificadas a cinética de solidificação do Pb e Al nos moldes em diferentes condições, a qualidade dos fundidos obtidos (macroestrutura, porosidade, rechupe e acabamento superficial); além da viabilidade econômica do processo.

Os resultados mostraram ótima qualidade do fundido, redução da porosidade interna e estrutura dependente da cinética de solidificação (em geral equiaxial grosseira).

Diante dos resultados, conclui-se que o processo é plenamente viável de ser utilizado.

## ABSTRACT

It was analysed the viabilities of production and utilization of frozen moulds to be used for non ferrous metals (Pb and Al) casting. For these purposes, it was obtained moulds in different mixture conditions ( 2,4,6% water added to AFS 45-50 and AFS 90-100 sands) and freezing temperature (-50, -70, - 90 e -110°C). It was investigated the freezing time in all situations, yield strenght, in air and during solidification of the metal heating times, in all the aquieved moulds.

Results showed to be favourable in every aspects: easy productions and operation of mould, mechanical characteristics higher than those of conventional sand moulds, high in-air heating time and compatibility between heating time of mould and solidification time of ingot in it.

It was also investigated the kinetics of Al and Pb solidification in frozen moulds and the quality of ingots obtained: their superficial quality, porosity, shrinkage, macrostructure); economical viability of the process.

The results showed ingots of very good quality, reduction of internal porosity and macrostructure depending of solidification kinetics (coarse equiaxial, in general).

It was possible to conclude that the process is viable to be easily utilized.

# I N D I C E

	<u>PÁGINA</u>
<u>CAPITULO 1: TECNOLOGIA DE FUNDIÇÃO</u>	01
1. PROCESSOS CONVENCIONAIS DE FUNDIÇÃO	01
1.1. PROCESSOS DE FUNDIÇÃO COM MOLDES NAO COLAPSAVEIS	02
1.1.1. Moldes Permanentes	02
1.1.2. Moldes Semipermanentes	04
1.1.3. Fundição sob Pressão	06
1.1.4. Fundição Centrífuga	07
1.2. PROCESSOS DE FUNDIÇÃO COM MOLDES COLAPSÁVEIS	
1.2.1. Moldagem em Areia Verde	08
1.2.2. Moldagem em Areia Seta	09
1.2.3. Moldagem em Areia-Cimento	11
1.2.4. Moldagem em Areia de Macho	11
1.2.5. Moldagem por Processo de CO <sub>2</sub>	12
1.2.6. Moldagem em Casca	13
1.2.7. Moldagem com Resinas de Cura a Frio	15
1.2.8. Moldagem por Cera Perdida	15
1.2.9. Processo de Moldes Cerâmicos	17
1.2.10. Fundição em Molde Cheio	17
2. AREIAS DE MOLDAGEM	20
2.1. DEFINIÇÃO	
2.2. CLASSIFICAÇÃO DAS AREIAS DE MOLDAGEM	20
2.2.1. Quanto à Origem	20
2.2.2. Quanto ao Uso na Caixa de Moldagem	21
2.2.3. Quanto à Umidade	22

2.3. AREIAS-BASE	22
2.3.1. Areias-Base Silicosas	23
2.3.2. Areias-Base Zircônitas	23
2.3.3. Areias-Base Cromitas	24
2.3.4. Areias-Base Olivinas	24
2.4. OS AGLOMERANTES	
2.4.1. Aglomerantes Inorgânicos	24
2.4.1.1. Argilas	25
2.4.1.2. Cimento	30
2.4.1.3. Silicatos	30
2.4.2. Aglomerantes Orgânicos	
2.4.2.1. Aglomerantes Derivados de Cereais	31
2.4.2.2. Resinas	32
2.4.2.3. Pixe	33
2.5. ADITIVOS	33
2.5.1. Serragem	34
2.5.2. Pó de Carvão	34
2.5.3. Pó de Sílica	34
2.5.4. Mogul	34
2.6. PROPRIEDADES DAS AREIAS DE MOLDAGEM	35
2.6.1. Granulometria	35
2.6.2. Permeabilidade	37
2.6.3. Estabilidade Térmica Dimensional	37
2.6.4. Refratariedade	38
2.6.5. Estabilidade Química	40
2.6.6. Colapsibilidade	40
2.6.7. Moldabilidade	41
2.6.8. Desmoldabilidade	42
2.7. PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO DE AREIA	

2.7.1. O Recondicionamento da Areia	43
2.7.2. A Recuperação da Areia	44
3. PROCESSOS DE FUNDIÇÃO NÃO CONVENCIONAIS	50

CAPÍTULO 2: SOLIDIFICAÇÃO DE METAIS

1. ESTRUTURAS DE SOLIDIFICAÇÃO	
1.1. MICROESTRUTURAS	53
1.2. MACROESTRUTURAS	55
1.2.1. A Zona Coquilhada	57
1.2.2. A Zona Colunar	60
1.2.3. A Zona Equiaxial	62
1.3. OS VAZIOS DE CONTRAÇÃO	67
i. Rechupe Localizado	70
ii. Contração Unidirecional	70
iii. Cavidades Internas	71
iv. Microporos	71
v. Porosidades Superficiais	71
2. INFLUÊNCIAS DO MOLDE NA ESTRUTURA	73
2.1. O MATERIAL DO MOLDE	73
2.2. A RUGOSIDADE DAS PAREDES DO MOLDE	74
2.3. O COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO DE CALOR ( $h_i$ )	74

3. INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA NAS PROPRIEDADES DOS METAIS	75
--	----

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

1. MATERIAIS

1.1. AREIAS	78
1.2. AGLOMERANTES	78
1.3. METAIS	78
1.4. MEIO RESFRIADOR	79
1.5. INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE TEMPERATURA	79

2. MÉTODOS UTILIZADOS

2.1. CONFEÇÃO DOS MOLDES DE AREIA	79
2.2. TÉCNICA DE CONGELAMENTO DOS MOLDES	80
2.3. FUSÃO E VAZAMENTO DO LÍQUIDO	84
2.4. PREPARO DE MACROS E MICROGRAFIAS	84

3. ENSAIOS DE AREIAS E MOLDES

3.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AREIAS	85
3.2. CONFERÊNCIA DO TEOR DE ÁGUA ADICIONADO	86

3.3. MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA À TRACÃO DOS MOLDES	86
3.4. ENSAIO DE DUREZA SUPERFICIAL	89

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES

1. ANÁLISE DA MATÉRIA-PRIMA	
1.1. UMIDADE DAS AREIAS-BASE	90
1.2. GRANULOMETRIA	90
2. OS MOLDES CONGELADOS: VIABILIDADE DE CONFECÇÃO E UTILIZAÇÃO	95
2.1. CONGELAMENTO	96
2.2. DESCONGELAMENTO AO AR	98
2.3. PROPRIEDADES DOS MOLDES	
2.3.1. Limite de Resistência	104
2.3.2. Dureza e Permeabilidade	110
3. A FUNDIÇÃO EM MOLDES CONGELADOS - VIABILIDADE DE OPERAÇÃO	
3.1. ASPECTOS GERAIS DE OPERAÇÃO	114
3.2. CINÉTICAS DE DESCONGELAMENTO E SOLIDIFICAÇÃO	
3.2.1. Tempo Descongelamento Areia com Metal Líquido	114

3.2.2.	Tempo de solidificação do Metal	119
3.2.3.	Viabilidade da Fundição -- $t_{\text{aquec.}} \times t_{\text{sol.}}$	125
4.	QUALIDADE DO FUNDIDO OBTIDO EM MOLDES CONGELADOS	
4.1..	QUALIDADE SUPERFICIAL DOS LINGOTES	130
4.2.	RECHUPES	131
4.3.	MACROESTRUTURA	131
4.4.	POROSIDADE	138
4.5.	ASPECTOS ECONÔMICOS DO PROCESSO	144

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

5.1.	QUANTO À VIABILIDADE CONFEÇÃO DOS MOLDES	148
5.2.	QUANTO À VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO	148
5.3.	QUANTO À QUALIDADE DOS FUNDIDOS	149
5.4.	QUANTO À VIABILIDADE ECONÔMICA	150

## I N T R O D U Ç Ã O

Nos últimos tempos, os fundidores tem dispendido extenuantes esforços no desenvolvimento de diferentes processos de fundição.

Em termos gerais, em cada um destes processos é necessário uma preparação prévia ao vazamento, isto é, preparar o molde para receber o metal líquido. As variações existentes entre os métodos particulares de confecção destes moldes, principalmente consistem nas diferentes operações de preparação destes moldes e os machos, sendo usualmente determinados pelos tipos de materiais usados no processo.

Contudo, o método tradicional de fundição em moldes de uso individual pode ser dividido de acordo com o tipo de areia usado e o método de aglomeração desta. Assim, duas principais "gerações" de areia de moldagem podem ser distinguidas:

- Areias aglomeradas com argila (podendo ser estas areias naturais, semi-sintéticas ou sintéticas), endurecidas por meio de compactação ou por empacotamento e secagem, e
- Areias aglomeradas por cura a frio ou quente, podendo utilizar aglomerantes orgânicos ou inorgânicos, as que são endurecidas através de reações químicas.

Em ambos tipos de "gerações" de processos de fundição mencionados o componente mais caro é o aglomerante, cujo custo varia de 30 a 85% do custo total da mistura, dependendo, logicamente, do tipo de aglomerante usado.

Por outra parte, os aglomerantes tem um importante efeito nas condições de trabalho dentro de uma fundição: se são usados na forma de pó, eles poluem a atmosfera, e, no caso de serem usadas as resinas sintéticas, a poluição da atmosfera é provocada pela formação de gases gerados na sua decomposição.

Ainda, a limitação da aplicação de aglomerantes permanentes, como o caso das argilas, resulta no fato que, na prática, essas areias podem ser usadas só uma vez para confeccionar o molde. Após o enchimento do molde com o metal líquido e

obtenção do fundido, a areia deve ser despejada, o que também contribui com a poluição do meio ambiente, ou, ser submetida a complicados processos de recuperação para um reaproveitamento e posterior re-utilização.

Recentemente tem aparecido na literatura algumas informações de novas gerações de moldagem em areia, os chamados "processos sem aglomerantes". Neste grupo podem ser citados os processos de moldagem magnética e o processo de moldagem por vácuo, também conhecido por Processo V.

Desta maneira, considerando a possibilidade de eliminação de aglomerantes, tem surgido a ideia da aglomeração e endurecimento de moldes e machos através da diminuição da temperatura da areia, abaixo do ponto de congelamento dos componentes líquidos da mistura, sendo assumido que esta mistura contém, na sua forma final, são areia e o componente líquido, água, que através de seu congelamento, aglomera os grãos de areia.

A escassa literatura encontrada atualmente sobre o método de confecção de moldes através do congelamento destes, aparecida na União Soviética e Inglaterra, e mais recentemente na Polónia e Japão, principalmente tem sido destinadas as investigações muito particulares, e, até certo ponto, de caráter geral.

E, pois, objetivo deste trabalho, estudar de uma maneira mais sistemática e detalhada as diversas características do processo de confecção de moldes de areia congelada; e também, características dos fundidos obtidos com a utilização deste processo.

O intuito é contribuir nas pesquisas buscando soluções a inúmeras incógnitas e problemas de caráter prático, necessários a serem esclarecidos antes de por em prática o processo em escala industrial.

## CAPÍTULO 1: TECNOLOGIA DE FUNDIÇÃO

Neste capítulo serão vistos os processos convencionais de fundição; os materiais empregados na confecção de moldes colapsáveis, suas características e propriedades, bem como a possibilidade de sua reciclagem, após desmoldagem do fundido; serão ainda apresentadas recentes pesquisas feitas, no sentido de sanar dificuldades advindas da utilização de moldes colapsáveis convencionais - os processos não convencionais de moldagem, nos quais são empregadas areias livres de aglomerantes.

### 1. PROCESSOS CONVENCIONAIS DE FUNDIÇÃO

Devido aos numerosos processos que podem ser utilizados em fundição, os fundidores confrontam-se frequentemente com o problema da escolha entre processos competitivos.

Exigências de qualidade das peças fundidas aumentam dia a dia: maior precisão de medidas, melhor acabamento, melhores propriedades mecânicas.

Além das vantagens técnicas, procuram-se dos processos de fundição vantagens de ordem econômica, no que se refere ao custo operacional, procurando manter os investimentos dentro dos limites compatíveis, sem perder de vista a economia de escala ditada pelo nível de produção desejada.

Devido à importância do molde e aos numerosos materiais utilizados na sua confecção, os processos básicos de fundição são tradicionalmente caracterizados pelo processo de moldagem empregado.

Contudo, uma classificação mais abrangente pode ser empregada se for considerado o número de peças fundidas no mesmo molde. Desta maneira, poderíamos classificar

os moldes desde o ponto de vista da destruição do molde para cada peça após a fundição (moldes colapsáveis) e a não destruição deste, durante uma vida determinada (moldes permanentes).

Desta maneira, a nossa classificação distinguiria os seguintes tipos de processos de fundição.

Processos nos quais são utilizados moldes não colapsáveis:

- Moldes Permanentes
- Moldes Semipermanentes
- Moldes para Vazamento sob Pressão
- Processo de Centrifugação

Processos nos quais são utilizados moldes colapsáveis:

- Moldagem a Verde
- Moldagem a Seco
- Moldagem em Areia-cimento
- Moldagem em Areia de Macho
- Processo  $\text{NaSiO}_4/\text{CO}_2$
- Moldagem em Casca
- Processo de Cura a Frio
- Processo de Cera Perdida
- Processo de Moldes Cerâmicos
- Fundição em Molde Cheio

## 1.1. PROCESSO DE FUNDIÇÃO COM MOLDES NÃO COLAPSÁVEIS

### 1.1.1. MOLDES PERMANENTES

Tecnicamente, um molde permanente é aquele no qual o metal pode ser vazado mais de uma vez sem variações das dimensões das peças fundidas nele.

De uma forma geral, pode ser utilizado qualquer material que reúna as condições de refratariedade necessárias para a retenção de um determinado metal líquido.

A utilização de moldes permanentes data dos inícios da fundição, tendo sido achados moldes com mais de 5000 anos, de pedra e bronze, para a confecção de armas, ferramentas e adornos.

Posteriormente, com a introdução da fundição de metais ferrosos, adveio a necessidade de moldes mais refratários, desenvolvendo-se o uso de moldes de areia.

Atualmente, os moldes permanentes são feitos em metal, geralmente aço ou ferro fundido, e, em alguns casos, bronze, sendo acabados por usinagem. Estes moldes são geralmente denominados "coquilhas", de onde provem a expressão "fundição em coquilha", sendo o vazamento feito por gravidade, na maioria dos casos. Na confecção do molde ou coquilha devem ser previstos e usinados canais de entrada e distribuição de metal líquido, respiros para a saída de ar do molde, alimentadores, etc. A vida útil das coquilhas varia com o tipo de metal vazado e das temperaturas de vazamento, oscilando, por exemplo, de 5.000 peças para Fe fundido até 100.000 para ligas de Zn e Mg (1), quando estes metais são vazados em coquilhas de aço.

O metal líquido é vazado no molde de forma convencional e o preenchimento da cavidade se dá por gravidade.

Este processo é muito adequado para produções em larga escala de peças pequenas e simples, sem rebaixas complexos ou partes internas intrincadas, obtendo-se, em geral, bom acabamento superficial e boa definição de detalhes.

Uma variação do sistema de fundição em molde permanente é o processo de lingotamento contínuo.

Metais não ferrosos (Alumínio e Cobre) desde muito tempo eram fundidos em barras em máquinas de lingotamento verticais contínuas, onde o metal líquido é mantido a temperatura uniforme numa panela intermediária e de onde é vazado para um molde metálico, resfriado a água, com a seção da barra ou perfil desejado.

Neste molde se procede a solidificação. A barra solidificada é puxada à velocidade definida e constante, de modo a que, na saída do molde, uma camada sólida de espessura suficiente para suportar a pressão do líquido no seu interior tenha sido formada.

O lingotamento contínuo é hoje largamente utilizado, tanto para metais não ferrosos, para os quais novos sistemas, além do vertical, foram desenvolvidos, como também para aços de diferentes tipos.

#### 1.1.2. MOLDES SEMIPERMANENTES

Os moldes semipermanentes são moldes de materiais refratários, que podem ser utilizados mais de uma vez, porém não alcançam o grau de durabilidade dos moldes permanentes.

Os materiais usados na sua confecção podem ser grafite, cerâmica refratária, gesso, vidro ou borracha.

Os moldes de grafite são fáceis de usinar, são altamente refratários e tem boa condutividade térmica, porém são frágeis e se oxidam a 4300C (1).

Uma das aplicações largamente utilizadas dos moldes de grafite em fundição de aços é na produção de rodas ferroviárias, onde, apesar da alta temperatura de vazamento (~1.6000C), o molde resiste sem

problemas, podendo, posteriormente, ser usinado e reutilizado para a fundição de rodas de maior diâmetro.

Os moldes semipermanentes em gesso já foram utilizados pelos chineses há 3.000 ou 4.000 anos e, na Idade Média, Da Vinci e Cellini usaram moldes de gesso para produzir suas obras de arte.

A principal vantagem deste processo é que peças de metais não ferrosos com seções finas e formas complexas podem ser feitas com excelente acabamento e exatidão.

Uma variante do processo de fundição em moldes de gesso é o "processo Antioch" (desenvolvido por M. Beau, no Antioch College, Ohio), que usa como material de molde uma mistura de areia, talco, silicato de sódio, gesso e água. A areia atua como material base (massa) e o gesso como aglomerante, podendo, com este material, ser obtidas peças fundidas com tolerâncias até de 0,01 mm em peças pequenas e 0,03 mm em peças grandes (2).

Um exemplo típico deste processo é a fabricação de moldes para confecção de pneus. Os moldes de vidro são utilizados limitadamente para ligas de baixo ponto de fusão e pequenas peças de alumínio, permitindo um bom acabamento, porém com o inconveniente da fragilidade do molde.

Os moldes de borracha são utilizados também para fundir pequenas peças de metais de baixo ponto de fusão (Pb e Sn).

Tanto os moldes de borracha como os de vidro têm utilização específica e são restritos a casos especiais.

### 1.1.3. FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

A fundição sob pressão é uma variedade dos processos que utilizam moldes permanentes, a qual se diferencia do processo em coquilha, principalmente, porque, ao invés do preenchimento do molde apenas por ação da gravidade, esta é feita por ação de uma pressão exercida sobre o líquido, empurrando-o para matrizes apropriadas. Estas matrizes são abertas mecanicamente, após a solidificação do metal, liberando a peça fundida e, após limpeza e lubrificação, novamente fechada para receber um novo vazamento.

Em geral, o processo é utilizado, quando o número de peças a serem produzidas é muito alto, a sua geometria apropriada, isto é, por exemplo, quando a espessura das paredes da peça é fina (no processo de fundição sob pressão alcança-se espessura de até 1 mm), aliados à necessidade de alta precisão dimensional a grande volume de produção.

Este processo utiliza altas pressões de trabalho, usando-se pressões de até 11 kg/mm<sup>2</sup> para ligas de Alumínio e Zinco, por exemplo.

Existem dois processos básicos: o de câmara quente e o de câmara fria. No processo de fundição que utiliza máquinas de câmara quente, estas possuem um reservatório para conter o metal em estado líquido, no interior de um forno que faz parte do próprio equipamento, sendo o metal bombeado diretamente pelo pistão da máquina injetora à cavidade do molde.

As máquinas de câmara quente são geralmente utilizadas para a injeção de metais de baixo ponto de fusão, principalmente ligas à base de Zinco, sendo injetadas a uma temperatura em torno de 400°C.

Para ligas de maior ponto de fusão, como as ligas de Alumínio, que precisam ser injetadas a temperaturas superiores a 6000C, utilizam-se máquinas de injeção com câmara fria, que são aquelas que possuem uma câmara adjacente ao molde, fora do recipiente contendo o líquido. Tal câmara com o metal líquido, que é forçado para o interior da cavidade do molde através da ação do pistão.

#### 1.1.4. FUNDIÇÃO CENTRÍFUGA

O processo de fundição centrífuga, embora mais largamente empregando moldes permanentes, pode ser também empregado com moldes de areia, moldes em casca ou mesmo molde de cera perdida.

Este sistema envolve a solidificação do metal num molde rotativo, o qual gira ao redor de seu eixo de simetria. A força centrífuga distribui o metal no molde, ocasionando produtos com reduzido teor de defeitos, tais como oxidação ou gases retidos.

O processo pode ser classificado em duas categorias principais:

- Fundição Centrífuga, onde o eixo de rotação coincide com o eixo de simetria da peça, a que recebe pressões uniformes em toda a sua seção, por exemplo, no caso de produção de tubos de Fe fundido.
- Fundição Semicentrífuga, utilizada para formas, onde existe simetria num eixo central, sendo feita a alimentação do líquido por meio de um canal central, que coincide com o eixo de rotação.

As peças que se prestam a ser fundidas por este processo devem apresentar uma seção apreciável, no sentido radial, como, por exemplo, rodas, engre-

nagens, discos e outras peças que giram em torno de seus eixos de simetria.

- Existe ainda um terceiro tipo, denominado de "peças centrifugadas", as quais podem ser de um formato qualquer. O vazamento é feito no molde sob rotação, em torno de um canal que alimenta as peças dispostas radialmente em torno do canal, em forma de árvores, simétrica ou assimetricamente.

Este método foi largamente utilizado nos Estados Unidos, durante a Segunda Guerra Mundial, para a fundição de peças de aço destinadas a substituir peças forjadas, de um baixo rendimento produtivo.

## 1.2. PROCESSOS DE FUNDIÇÃO COM MOLDES COLAPSÁVEIS

### 1.2.1. MOLDAGEM EM AREIA VERDE

Em geral, é o processo mais conhecido e mais utilizado em fundições, por motivos de economia, por produzir peças com boas qualidades, e por ser conveniente a aplicação para produzir peças em série.

Basicamente, consiste em compactar uma mistura apropriada de areia base, aglomerante e água e, eventualmente, aditivos com fins específicos sobre um modelo com a forma da peça a ser fundida.

A areia base e o aglomerante mais comuns são, respectivamente, areia silicosa e argila. A compactação da areia sobre o modelo pode ser feita manualmente, com o auxílio de soquetes a ar comprimido ou com o auxílio de máquinas de moldar, por vibração ou por lançamento da areia sob pressão.

Uma vez retirado o modelo, o molde é fechado (e colocados eventualmente os machos, respiros, res-

friadores, massalotes necessários), podendo ser feito o vazamento, sem necessidade de secagem, condição que determina seu nome de "em estado verde".

Em alguns casos especiais o molde pode ser seco superficialmente, aumentando a sua rigidez e melhorando a qualidade do acabamento superficial do fundido, uma vez que são reduzidos a evolução de gases do molde e a erosão feita pelo metal líquido. Esta secagem superficial é feita com auxílio de secadores manuais (queimadores ou lâmpadas de infravermelho) ou ainda pela queima de álcool ou outros líquidos voláteis, contidos numa pintura superficial.

Os moldes assim secos devem ser vazados sem demora, para evitar a infiltração de umidade desde o seu interior.

Na confecção de moldes em areia verde, podem ser utilizadas areias naturais (que já contêm na sua composição o teor de argila suficiente para permitir uma boa moldabilidade), semi-sintéticas (que necessitam de uma correção na sua composição) e sintéticas (misturas produzidas pouco antes da moldagem).

Do ponto de vista produtivo, o processo de areia a verde presta-se a uma excelente sincronização entre a operação de moldagem e a de fusão do metal, uma vez que os moldes podem ser vazados imediatamente após confeccionados.

#### 1.2.2. MOLDAGEM EM AREIA SECA (MOLDES ESTUFADOS)

A operação de moldagem em areia seca se efetua, de modo geral, da mesma forma que em areia verde, com exceção de que, na parte final, os moldes são secados em estufa a temperaturas de ordem de 150 a 300°C.

As areias para moldes estufados devem ter resistências a seco suficientes para resistir a erosão do molde durante o vazamento e as pressões estáticas do metal, sendo usadas em geral areias de granulometria grossa.

A secagem dos moldes de areia seca se faz em estufas especiais equipadas com dispositivos de circulação intensiva do ar quente, obtendo-se uma maior estabilidade dimensional do molde, maior permeabilidade e maior resistência à penetração do metal, quando comparados com o processo de areia verde.

Em geral são utilizados cinco tipos de moldagens em areia seca:

- Moldagem em caixa, aplicada a peças pequenas, é igual ao processo de moldagem a verde, salvo no que se refere a secagem dos moldes.
- Moldagem no chão, aplicada a grandes peças, principalmente em superfície, dispensa a caixa de fundo, que é moldada diretamente no chão da área de moldagem, em local devidamente escavado e preparado.
- Moldagem em poço, aplicada a grandes peças, é similar à moldagem no chão, salvo a profundidade do mesmo. Este tipo de processo dispensa as caixas de moldagens e possibilita a fundição de peças de grandes dimensões, dando, ademais, maior segurança aos operadores, durante o vazamento, uma vez que evita extravazamentos de panelas e moldes.
- Moldagem em barro, onde o esboço do molde é construído em tijolo, sendo que a camada final é dada por uma camada de barro. O molde de tijolo tem em seu interior uma armação de ferro, que é retirada após a solidificação do metal, para a desmoldagem.

- Moldagem em chamote, que utiliza misturas de argila refratária sílico-aluminosa, com tijolos refratários moídos, adicionando-se argila plástica para aglomeração e areia para aumentar a compactação do molde.

Geralmente, os processos de moldagem em areia seca são utilizados para fundir peças de ferro fundido de grandes dimensões, por exemplo, grandes cilindros de laminação.

#### 1.2.3. MOLDAGEM EM AREIA-CIMENTO

É utilizada na confecção de grandes peças, podendo ser comparada, do ponto de vista operacional, com o processo de moldagem em areia seca, com a vantagem sobre este que não requer calor, nem equipamentos de secagem.

Este processo utiliza areias silicosas-grossas (40 a 80 A.F.S.) com aproximadamente 10% de Cimento Portland e até 5% de água, sendo feita a secagem do ar, durante o tempo necessário (geralmente 2 a 3 dias) para seu endurecimento, o qual lhe fornece grande resistência mecânica.

O custo elevado da mistura areia-cimento, a impossibilidade da sua recuperação e a colapsibilidade deficiente (uma vez que é difícil a desmoldagem) tornam o processo pouco utilizado.

#### 1.2.4. MOLDAGEM EM AREIA DE MACHO

Neste caso, os moldes são feitos com misturas de areias normalmente utilizadas para a confecção de machos. São areias que apresentam alta resistência, colapsibilidade e permeabilidade.

A mistura de areia difere da areia a seco, por exemplo, quanto ao tipo de aglomerante. Enquanto no último caso são utilizados aglomerantes inorgânicos, nas areias de macho são utilizados aglomerantes orgânicos, tais como: óleos vegetais, minerais, breus, etc. Estes aglomerantes sofrem cura a temperaturas da ordem de 220 - 290°C, devendo, portanto, os moldes confeccionados com tais misturas ser estufados para adquirir a resistência mecânica requerida.

Uma vez que os machos são geralmente rodeados de metal pelos lados, é muito necessária uma permeabilidade adequada para deixar passar os gases para a atmosfera.

A areia de macho é utilizada também para partes críticas de moldes grandes, cujos detalhes são constituídos de seções montadas na cavidade do molde e para moldes de peças complicadas e de pequenas espessuras de parede.

#### 1.2.5. MOLDAGEM POR PROCESSO CO<sub>2</sub>

O processo CO<sub>2</sub> consiste na utilização de moldes de tipo convencional, de areia aglomerada com silicato de sódio. Após a compactação por métodos normais, os moldes são submetidos a um tratamento de gasagem com CO<sub>2</sub>, provocando-se a passagem do gás através do molde.

Devido à reação entre o gás e o silicato de sódio, é formado sílica-gel, carbonato de sódio e água, resultando no endurecimento do molde em curto tempo, provocado pelo envolvimento dos grãos de areia pelo sílica-gel.

A reia utilizada consiste essencialmente numa mistura de areia silicosa e de aglomerante à base de silicato de sódio, em teores de 2.5 a 6%, porém vem-se procurando desenvolver misturas de areias com propriedades de autocura. Neste sentido, estão se desenvolvendo aglomerantes consistentes em misturas de areias convencionais com 5% de silicato de sódio e 2% de cimento Portland (3).

Em geral, embora o processo de CO<sub>2</sub> proporcione moldes rígidos e com resistências elevadas, em apenas alguns segundos de gasagem não se presta para produções em grau de escala, devido às variações de características em diferentes regiões, provocadas pela dificuldade de injeção do gás de maneira uniforme.

#### 1.2.6. MOLDAGEM EM CASCA

É um processo originário da Alemanha, pesquisado com o nome de "Processo Croning", e desenvolvido nos Estados Unidos sob o nome de "Shell-Molding", durante a Segunda Guerra Mundial, a partir de 1940.

Consiste no emprego de uma mistura de areia de granulometria fina e resina sintética polimerizável a quente, a partir da qual são obtidos os moldes em forma de cascas finas (espessuras da ordem de 0.5 mm) (2) após o processo de cura da resina.

A mistura, em forma de pó, é depositada sobre o modelo, que está pré-aquecido a temperaturas da ordem de 150 - 350°C. No contato, é formada uma casca decorrente da polimerização da resina, pois esta reação produz uma película contínua e rígida, envolvendo os grãos de areia.

A casca, parcialmente curada, deve ir à estufa para completar a cura, à temperaturas da ordem de 280 - 350°C.

Os modelos, em geral bipartidos, são usinados ou montados em placas metálicas, usualmente vários deles montados em forma de árvore, ligados pelos canais de distribuição do líquido, em uma só placa.

As cascas obtidas, a partir das duas placas que constituem as duas metades dos modelos, são grampeadas ou coladas de modo a constituir o molde. Este molde é então colocado no interior de caixas, contendo areia ou granalha, de modo a não permitir sua abertura ou rompimento, quando da entrada do metal líquido, estando, portanto, pronto para o vazamento.

Após a solidificação do fundido, procede-se à desmoldagem com facilidade.

sura das cascas, pode-se utilizar, para sua confecção, areias de alto módulo de finura (da ordem de 90 a 140 A.F.S.), o que permite acabamentos excelentes para as peças fundidas por este processo.

Também, como a resistência da casca é muito elevada, a rigidez dela permite manter uma alta precisão dimensional, podendo permitir, em alguns casos, a dispensa da usinagem posterior. É um processo, portanto utilizado para peças de pequenas dimensões, tanto de metais ferrosos como não ferrosos, que requeiram alta qualidade.

Dentre as desvantagens deste processo, pode-se citar que a confecção do modelo deve ser feita com o acabamento e precisão da peça a ser fundida, uma vez que a casca reproduz com alta fidelidade as suas formas e dimensões, o que se traduz num alto custo. Também, o alto custo das resinas utilizadas (que entram em proporções de 3 a 10% da mistura) e a impossibilidade de reaproveitamento posterior da areia são fatores preponderantes no custo final das peças e restringem o campo de aplicação deste processo.

#### 1.2.7. MOLDAGEM COM RESINAS DE CURA A FRIO

Neste processo são utilizadas areias aglomeradas com resinas químicas, as quais são auto-endurecedoras, de cura à temperatura ambiente.

O processo de cura a frio tem sido bastante difundido nos Estados Unidos e na Europa, onde é conhecido como "processo Pep-Set", e, em certos casos, tem substituído completamente o processo de moldagem a verde (4).

As resinas de cura a frio mais comuns são as furânicas (aparecidas no mercado em 1958), as alquídico-uretano (em 1964) e as fenólico-uretano (em 1970).

Estas resinas polimerizam a temperatura ambiente, utilizando endurecedores, mistura de duas resinas ou catalizadores para a cura. Estas reações serão descritas na seção 2.4.2.2.

As principais vantagens com relação à moldagem a verde, é a menor presença de poluição sonora (não há necessidade de moldadoras, uma vez que o grau de compactação requerido não é alto), a desmoldagem é mais fácil (20 minutos após o vazamento, o molde geralmente começa a trincar-se por si só (4)) e menor quantidade de defeitos provocados pela umidade do processo a verde, uma vez que o processo de cura a frio utiliza areias com umidade natural.

Em geral, este processo é utilizado para fundição de ferros fundidos e aços, para peças de geometria complicada e que requeiram uma rígida estabilidade dimensional.

#### 1.2.8. MOLDAGEM POR CERA PERDIDA

Este processo de fundição já era utilizado na China, durante a dinastia Shang e no Egito, entre os

anos de 1766 a 1122 AC, na confecção de jóias e objetos artísticos. Durante a Segunda Guerra Mundial, desenvolveu-se rapidamente para a fabricação de pequenas peças de precisão, tendo atualmente diversas aplicações, como, por exemplo, na fabricação de aletas de turbinas de aviões, confecção de próteses dentárias, etc.

O processo consiste na produção de modelos de precisão feitos em cera ou plástico. Vários modelos são montados sob um canal de distribuição de líquido, feito no mesmo material, formando uma árvore. O conjunto é revestido de uma lama de material refratário, de granulometria extremamente fina (gesso, pó de sílica, pó de zirconia, etc.) que adere à cera.

Após a secagem da lama refratária, o conjunto é submetido a aquecimento, com a consequente fusão e expulsão do modelo, deixando pronta a cavidade do molde.

A secagem é completada a temperaturas mais altas, na ordem de 650 a 1000°C, o que permite uma queima total do modelo e uma eliminação total da umidade. Uma vez pronto o molde, processa-se o vazamento do metal líquido, podendo ser aplicadas pressões ou vácuo para garantir o seu preenchimento completo.

O acabamento superficial, em geral, é ótimo, as peças requerem um mínimo de usinagem posterior, podendo até dispensá-lo. Peças com geometria complexa podem ser produzidas por este processo, apesar da alta precisão requerida para os moldes metálicos utilizados para a confecção dos modelos e da necessidade de um modelo por peça.

O processo de cera perdida é utilizado, em geral, para fins específicos e especiais, onde alta qualidade é requerida, uma vez que seu custo é elevado, exige mão-de-obra especializada e os materiais utilizados são de alto custo.

### 1.2.9. PROCESSO DE MOLDES CERÂMICOS

Este processo de fundição pode ser considerado uma variação do processo de moldagem por cera perdida e foi introduzido pelos ingleses Clifford e Shaw (2).

Em termos gerais, a moldagem é feita a partir de um modelo metálico sobre o qual é colocada uma pasta cerâmica, à base de zirconita, mulita e etil-silicato, a qual atua como aglomerante.

A pasta, antes de endurecer totalmente, é flexível e pode ser destacada do modelo sem romper-se para, posteriormente, sofrer um processo de secagem para o endurecimento definitivo e aumento da resistência mecânica, obtendo-se uma casca granulada, que pode receber todos os metais, inclusive aço.

Este processo é capaz de produzir peças fundidas com finos detalhes e superfícies lisas, características que o fazem utilizável para a confecção de peças complexas, particularmente objetos de arte.

### 1.2.10. FUNDIÇÃO EM MOLDE CHEIO

No processo de fundição em molde cheio, o metal líquido é vazado sobre o modelo, que ainda ocupa a cavidade do molde, quando do vazamento.

Neste tipo de processo, o modelo consiste de uma ou várias peças construídas de material vaporizável à temperaturas inferiores as de vazamento do metal líquido.

O material geralmente utilizado para a confecção dos modelos é o poliestireno expandido.

Sobre o modelo é compactada (não é requerido um alto grau de compactação) a mistura de areia e vaporizado o metal líquido.

O modelo, ao vaporizar-se, permite o preenchimento do molde. Neste tipo de moldagem, cuidados especiais devem ser tomados quanto à liberação de gases gerados na queima do modelo, devendo ser planejados areia com alta permeabilidade e um número suficiente de respiros.

O princípio deste processo foi introduzido por H. F. Shroyer, em 1958 (2), sendo utilizado, inicialmente, para a fundição de objetos de arte.

A partir de 1962, quando foi utilizado comercialmente o poliestireno expandido, foram produzidas peças com um alto grau de precisão, sendo atualmente muito utilizado na indústria automobilística, representando hoje, de acordo com suas características de qualidade, simplicidade e baixo custo, grandes possibilidades de uso.

Como observado na apresentação geral dos processos de fundição, a disposição dos fundidores, até o momento, os que utilizam de areias de diferentes tipos e composições, representam uma grande maioria, uma vez que, quando comparados com os processos que utilizam moldes metálicos, são os de menores custos, quanto à matéria-prima, investimentos iniciais, operação, além de se prestarem a uma maior variedade de formas.

Além disso, produzem fundidos de ótima qualidade, desde que controladas as misturas e suas propriedades, bem como o perfeito projeto de modelos e moldes. Os moldes metálicos, por outro lado, além do alto custo, apresentam limitada liberdade de forma, sendo utilizados para fins específicos.

Assim, diante do espaço ocupado pelos moldes de areia, no campo da tecnologia de fundição, passaremos a uma apresentação dos materiais utilizados na confecção destes tipos de molde e suas características.

## 2. AREIAS DE MOLDAGEM

### 2.1. DEFINIÇÃO

Uma areia pode ser definida como um agregado de compostos minerais, na forma de partículas granulares resultantes de desintegração ou britagem de rochas. A forma das partículas ou grãos é aproximadamente esférica, sendo que seu diâmetro médio pode variar de 2 a 0.05 mm (5).

Quanto a uma areia de moldagem, seu conceito, modificado através do tempo, pode ser descrito como qualquer material de moldagem constituído de uma mistura, onde o principal componente seja um agregado mineral (areia-base), cujas partículas sejam mantidas coesas por um aglomerante (orgânico ou inorgânico). A mistura contém um certo teor de água e pode conter aditivos especiais que lhe conferem características específicas, conforme será analisado posteriormente.

Uma areia de moldagem é, portanto, um sistema heterogêneo, cujas características dependem dos teores relativos dos componentes da mistura e suas alterações.

As areias de moldagem destinam-se à confecção de moldes e machos para fundição e podem ser classificadas de acordo a diferentes critérios, desde o ponto de vista de constituição, origem, uso, etc.

### 2.2. CLASSIFICAÇÃO DAS AREIAS DE MOLDAGEM

#### 2.2.1. QUANTO À ORIGEM

- Areias naturais: são as que ocorrem em depósitos naturais, já com composição adequada à utilização. São caracterizadas por se acharem os grãos envolvidos em pasta argilosa (o teor de argila presente

ẽ da ordem de 5 a 20%), podendo ser utilizadas apenas com adiçãõ de água, na ordem de 5 a 8% da mistura na moldagem.

Este tipo de areia ẽ muito utilizado para moldagem a verde (onde o metal ẽ vazado no molde sem que este tenha sofrido secagem em estufa) para metais não ferrosos e ferro fundido. Estas areias, em geral, são de má qualidade, menos refratárias que as sintéticas, pois podem apresentar impurezas indesejáveis na sua composição.

- Areias sintéticas: são aquelas cuja mistura apropriada para moldagem deve ser feita artificialmente, isto ẽ, os diversos componentes da mistura ocorrem separadamente na natureza. Como a maioria das areias de moldagem são constituídas de areia-base e argilas como aglomerantes.

Geralmente são utilizadas em grandes moldes, que podem receber o metal a verde ou seco.

- Areias semi-sintéticas: são areias resultantes de modificações de areias naturais; são obtidas a partir de areias que apresentam, de forma natural, a maioria dos componentes necessários, sendo requeridas somente pequenas correções, quanto a trocas ou adições para melhoria de qualidade.

#### 2.2.2. QUANTO AO USO NA CAIXA DE MOLDAGEM

De acordo com a posição que ocupa na caixa de moldagem, as areias classificam-se em:

- Areia de faceamento: ẽ a areia que faceia o modelo e entra em contato com o metal no vazamento.

As características desta areia determinam o acabamento superficial da peça a ser fundida, por isto

devem possuir granulometria fina, alta refratariedade, alta resistência e reduzida umidade. Não deve conter elementos que possam reagir com o metal. São areias de alta qualidade e alto custo, utilizadas, portanto, somente numa camada de pequena espessura próximo às paredes internas do molde.

- Areia de enchimento: constitui o restante da caixa de moldagem.
- Areia de macho: são destinadas ao preparo de machos que contornam as cavidades internas da peça. Podem ser areias de granulometria mais grosseira e de inferior qualidade e, portanto, menores custos, quando comparadas com as areias de faceamento.

### 2.2.3. QUANTO À UMIDADE

De acordo com a umidade, podemos classificar as areias de moldagem em dois grupos:

- Areia verde: que mantém a umidade no momento do vazamento, embora uma secagem superficial possa ser impingida às superfícies internas do molde. Teores de umidade de até 8% podem ser admitidos.
- Areia estufada: são aquelas cuja umidade é reduzida por secagem em estufa, empregando-se para a confecção de machos, principalmente.

### 2.3. AREIAS-BASE

Como dito anteriormente, uma areia de moldagem, é, na verdade, uma mistura de componentes cujo principal é a areia-base.

Estas areias são obtidas em depósitos naturais, são fragmentadas, lavadas e classificadas segundo a composição básica, forma e dimensões de seus grãos, antes de utilizadas para moldagem.

As areias-base mais comumente utilizadas em fundições, classificadas segundo a composição básica, isto é, o tipo de mineral predominante em sua composição, são:

### 2.3.1. AREIAS-BASE SILICOSAS

São as compostas principalmente de  $\text{SiO}_2$  (97% da composição total) e são resultantes de fragmentação de rochas silicosas ou quartzosas. Na natureza são encontradas em bancos de rios ou lagos, praias e dunas ou jazidas onde antigamente existia água.

Na utilização para areias de moldagem, geralmente participam em teores de 50 a 95% do total da mistura.

Este tipo de areia é o mais utilizado em fundição, sendo mais baratas e de pior qualidade, quando comparadas com as citadas a seguir.

### 2.3.2. AREIAS-BASE ZIRCONITAS

São compostas principalmente de  $\text{ZrSiO}_4$  (Silicato de Zircônio) e são encontradas em praias e dunas.

É considerada uma areia especial, apresentando maior capacidade de extração de calor que as areias silicosas, proporcionando um resfriamento mais rápido do fundido; possuem menor coeficiente de expansão térmica, diminuindo a possibilidade de defeitos e maior ponto de fusão, prevenindo defeitos como penetração do metal na areia do molde.

Este tipo de areia é utilizado largamente para fundição de aços, já que seu maior custo que as silicosas é compensado pela maior qualidade do molde e do fundido produzido.

#### 2.3.3. AREIAS-BASE CROMITAS

Estas areias possuem, como composição básica,  $CR_2O_3+FeO$ , ocorrendo em depósitos.

São também consideradas areias especiais, pois apresentam características especiais, do tipo semelhantes às zirconitas, sendo também de alto custo.

São empregadas para grandes peças de aço e ferro fundido e especialmente para aços especiais.

#### 2.3.4. AREIAS-BASE OLIVINAS

São areias à base de magnésio, de composição  $Mg_2 Si_4 + Fe_2 SiO_4$ , ocorrendo em rochas ou em pedras arredondadas, que necessitam ser fragmentadas mecanicamente para sua obtenção.

Estas areias tem propriedades semelhantes às zirconitas, sendo também de alto custo.

#### 2.4. OS AGLOMERANTES

Podeseer dito que qualquer material adicionado a areia (ou que forme parte dela naturalmente) e que dê coesividade à mesma é chamado aglomerante. O aglomerante, ocupando os interstícios entre os grãos de areia, por alguns dos mecanismos descritos neste item, mantém coesos os grãos, permitindo a sua moldagem e a manutenção da forma, após esta operação.

Existem diversos tipos de aglomerantes orgânicos (óleos, resinas, cereais) e inorgânicos (argila, silicatos, cimento), dos quais o mais utilizado é a argila, principal constituinte das areias de moldagem, além da areia-base.

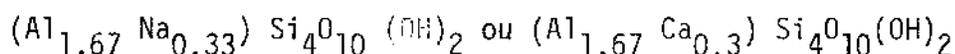
#### 2.4.1. AGLOMERANTES INORGÂNICOS

##### 2.4.1.1. ARGILAS

As argilas entram na composição da areia de moldagem, em teores da ordem de 5 a 20% da mistura (6). As principais argilas utilizadas para aglomerar areias de moldagem são:

##### a) Tipos de Argilas

i) Bentonitas, sendo o mineral predominante na sua composição a montmorilonita de sódio ou de cálcio, de fórmula estrutural.



As bentonitas são provenientes de cinzas vulcânicas, sendo seus pontos de amolecimento (refratariedade) a 1.130 - 1.315°C a bentonita sólida e 960°C a bentonita cálcica.

No Brasil, existem ocorrências de bentonita no Vale do Paraíba e Ponta Alta, M.G.

ii) Kaolinitas: são argilas de maior refratariedade de que as bentonitas (ponto de amolecimento em torno de 1.600 - 1.680°C) e sua composição básica é  $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ . São provenientes de rochas graníticas.

iii) Ilitas: são argilas de refratariedade média, entre as bentonitas e as kaolinitas (ponto de

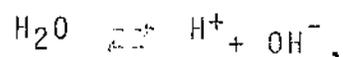
amolecimento igual a 1340°C), sendo sua composição básica  $Al_4K_2(Si_6Al_2)O_{20}(OH)_4$ . Sua origem, como as Kaolinitas, são rochas graníticas.

b) Mecanismos de Aglomeração

Os mecanismos pelos quais as argilas promovem a coesão dos grãos de areia podem ser relatados por três teorias: coesão eletrostática, forças de tensão superficial e ligações por fricção interpartículas.

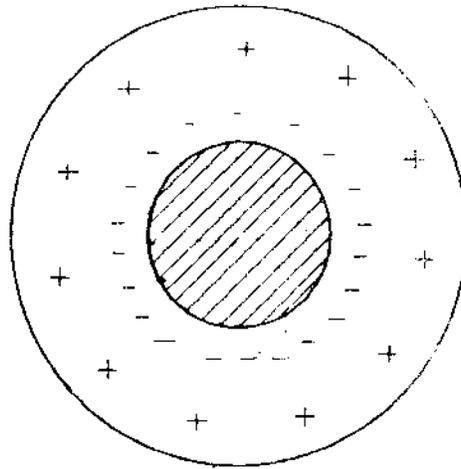
i) O mecanismo de Atração Eletrostática (7)

A argila seca não fornece a coesão necessária para aglomerar os grãos de areia firmemente: a aglomeração é desenvolvida somente quando as partículas de argila estão hidratadas. Na presença de moléculas de água, que tendem a hidrolizar-se de acordo com a reação:

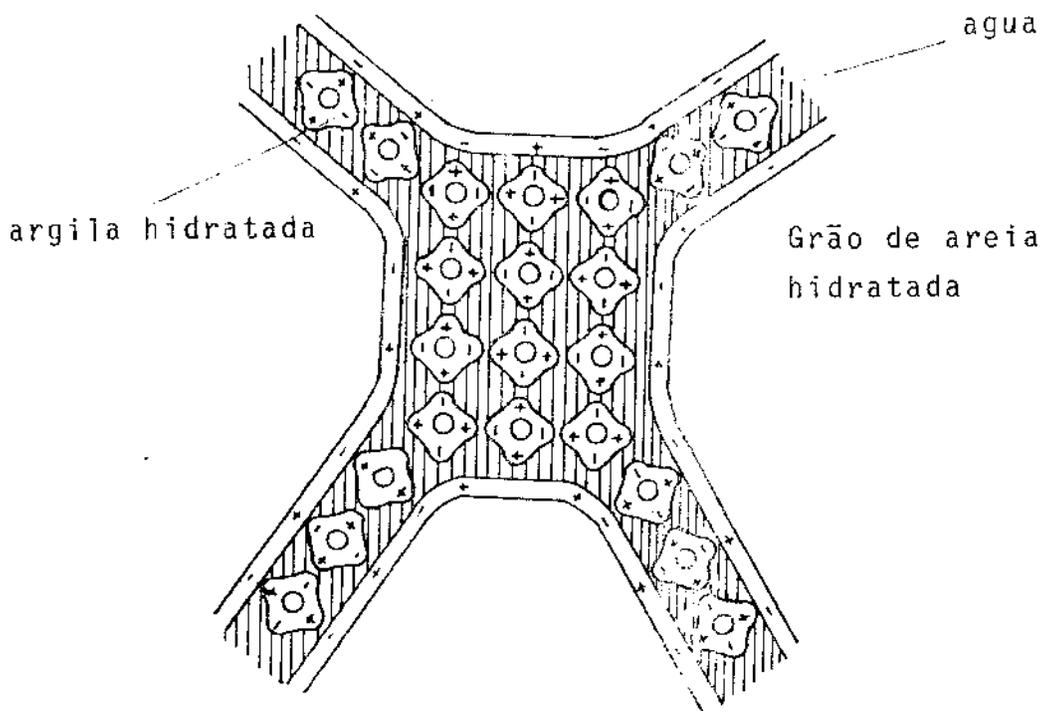


as partículas de argila absorvem preferencialmente íons hidrolizados ( $OH^-$ ), permitindo uma insatisfação de valências aglomeradoras na superfície do cristal de argila, formando uma partícula de argila-água carregada negativamente. Os íons positivos são atraídos pelos íons negativos da superfície das partículas de argila, porém, repelidos pelo interior desta partícula argila-água, resultando então um equilíbrio de posições, formando-se uma partícula de argila hidratada (vide figura 1.1(a)).

Rodeando a partícula de argila, existem íons negativos posicionados a diferentes distâncias desta partícula. Do lado externo desta camada, íons de hidrogênio carregados positivamente também estão localizados a diferentes distâncias do centro da argila, formando a denominada "camada difusa dupla" (7).



( a )



( b )

Fig. 1.1.(a) Partícula de argila hidratada  
1.1.(b) Processo de aglomeração da areia

As partículas de areia (quartzo) também formam partículas hidratadas pela absorção dos íons  $(OH)^-$  e  $(H)^+$ . Quando são formadas partículas hidratadas de quartzo e argila, os íons  $(OH)^-$  da partícula hidratada são atraídos pelo  $H^+$  contido nas partículas hidratadas de quartzo, resultando, então, uma atração eletrostática entre areia e partículas de argila e partículas de argila (Fig.1.1.(b))

ii) O Mecanismo da Tensão Superficial (7)

As forças desenvolvidas por atrações eletrostáticas entre partículas de areia e de argila não parecem ser fortes suficiente para explicar as propriedades de resistência das argilas verdes (em particular a alta resistência à deformação). Outra possível fonte de resistência aglomerante é a tensão superficial da água rodeando a argila e partículas de argila-areia e preenchendo os interstícios capilares, principalmente os interstícios das partículas de argila.

iii) O Mecanismo de Fricção Interpartículas

Também denominado "teoria bloco e cunha" (8), é considerado uma outra possível fonte de forças aglomerantes e que envolve, essencialmente, as fricções interpartículas desenvolvidas em materiais não-plásticos sob pressão, uma vez que os moldes são socados e as partículas são apertadas contra partículas vizinhas.

Uma orientação favorável dos grãos de areia, conseguidos através do socamento, causa um empacotamento destes, razão pela qual é possível mudar as propriedades de resistência das areias através de misturas de diversos tipos e formas de grãos, uma vez que são desenvolvidas forças de fricção.

Dos mecanismos citados, o mais importante ou o que, em maior grau, contribui para o efeito aglomerante de argilas sobre grãos de areia o que, por sua vez, confere a resistência mecânica de moldes feitos com estes materiais, parece ser o de atração eletrostática, não podendo, no entanto, ser desprezados os outros efeitos.

Assim, como pode ser notado, a água tem um papel fundamental na atuação da argila como aglomerante dos grãos de areia, podendo-se observar diferenças marcantes nas propriedades aglomerantes das diversas argilas, devidas às diferenças na sua capacidade de interação iônica com a água.

No caso das argilas bentonitas sódicas, estas tem grande poder aglomerante, podendo ser usadas em areias em baixos teores. Este tipo de bentonita se expande, quando é umedecida, apresentando uma estrutura aberta, de alta permeabilidade, gerando, então, poucos vapores e permitindo uma boa drenagem dos mesmos, quando o metal é vazado, sendo recomendada especialmente, quando os metais são de alto ponto de fusão e quando se tem grande evolução de gases.

As argilas kaolinitas possuem menor poder aglomerante que as bentonitas, produzindo moldes de estruturas fechadas e baixa permeabilidade, características que permitem a obtenção de ótimos acabamentos superficiais.

Estas argilas são utilizadas para metais de baixo ponto de fusão, quando não existe alto aquecimento do molde e pouca evolução de gases, recomendando-se especialmente para fundição de ligas de alumínio ou pequenas ligas de cobre.

#### 2.4.1.2. CIMENTO

O cimento é utilizado em misturas de areias de mol<sup>l</sup>dagem em teores de 8 a 12% da mistura, juntamente com 4 a 6% de água. Geralmente é utilizado para grandes moldes, que são comumente secados ao ar, por períodos de até 72 horas, antes de sua utiliza<sup>ç</sup>ão.

Os moldes de areia aglomerada com cimento desenvolvem uma alta dureza e resistência, sendo capazes de resistir até 1180°C, o que faz possível alcançar boas tolerâncias em peças de grande tamanho, tendo a vantagem de dispensar a secagem em estufa, uma vez que a secagem é dada ao ar.

#### 2.4.1.3. SILICATOS

Os silicatos, principalmente de sódio, podem ser utilizados como aglomerantes em substituição a aglomerantes orgânicos (por exemplo, óleos) ou com dióxido de carbono (processo CO<sub>2</sub>).

Como substituto de aglomerantes orgânicos, os silicatos são adicionados à areia-base e a mistura deve ser secada. A secagem provoca o endurecimento do silicato ao aumentar sua viscosidade com a diminuição do teor de umidade (9).

O processo CO<sub>2</sub> emprega misturas de areia-base com, aproximadamente, 4% de silicato de sódio, não sendo exigida compactação rigorosa dos moldes.

Ao se injetar no material socado CO<sub>2</sub>, sob condições controladas de vazão e tempo de injeção, a massa da areia com silicato de sódio endurece, desenvolvendo alta resistência a seco, podendo ser utilizado nas areias para confecção de moldes ou machos.

Como visto na seção 1.2.5. do capítulo 1, o poder aglomerante é dado pela formação de sílica-gel, pela reação do silicato de Na com  $CO_2$ , que envolve os grãos de areia. O endurecimento do gel, bem como a formação de  $NaCO_3$  na mesma reação com o  $CO_2$  fornecem o alto valor de resistência de moldes obtidos por este processo.

#### 2.4.2. AGLOMERANTES ORGÂNICOS

Os aglomerantes orgânicos utilizados para misturas com a areia base podem ser derivados de cereais (trigo, centeio, milho), resinas (naturais e sintéticas) e óleos (vegetais e animais).

##### 2.4.2.1. AGLOMERANTES DERIVADOS DE CEREAIS

São geralmente adicionados em forma de pó muito fino ou gelatinizados, em teores de até 2% da mistura, sendo de um custo relativamente baixo.

Proporcionam uma boa coesão aos grãos de areia, sendo utilizados para moldagem a verde, uma vez que atuam como colas, e a resistência a verde que eles comunicam a areia decorre dessa ação adesiva. Ao se queimarem (500 - 700°C), durante o vazamento, geram gases, que devem ser retirados do molde através de respiros.

Os aglomerantes cereais são higroscópicos e podem absorver a umidade da areia, modificando as características de resistências dos moldes, pelo que a sua adição requer cuidados especiais, tais como não expor os moldes ao ar, durante muito tempo antes do vazamento. Em geral, são utilizados para conferir características de resistência após (dextrinas) ou colapsibilidade (breu) aos moldes (1).

#### 2.4.2.2. RESINAS

Também são chamadas de gomas e podem ser naturais ou sintéticas.

As resinas naturais são derivadas da destilação de madeira ou petróleo ou da exudação de plantas (seringueira, por exemplo). São empregadas em teores de 1.5 a 8% na mistura da areia, podendo ser curadas a frio ou a quente (temperatura em torno dos 350°C); neste último caso, ao serem aquecidas, formam uma película coesa, por reações de polimerização, envolvendo os grãos de areia e mantendo-os aglomerados.

As resinas sintéticas são produto de reações de polimerização de alguns compostos químicos, tais como ácido bórico, sulfúrico ou furânico, sendo adicionados em proporções de 1.5 a 8% da mistura.

Podem endurecer por dois processos: em elevação da temperatura (cura a quente) ou temperatura ambiente (cura a frio).

A cura a frio geralmente se desenvolve muito rapidamente (em torno de uma hora), através da adição de um catalizador apropriado. A cura a quente é processada através do aquecimento da resina, a qual passa por um processo de oxidação e polimerização, sendo formadas redes de grande resistência.

As resinas sintéticas mais comuns são as de tipo furânicas (a partir de 1958), as alquídico-uretanas (a partir de 1964) e as fenólico-uretanas (a partir de 1970).

As resinas furânicas em geral contêm diferentes porcentagens de nitrogênio e água. Tais teores devem ser controlados, pois, dependendo do metal a ser vazado nos moldes aglomerados com estas resinas,

defeitos podem ser provocados pela presença destes elementos (por exemplo porosidades). Por exemplo, para a fundição de ferro são comercializadas resinas furânicas com até 4% de  $N_2$  e até 20% de  $H_2O$ , e para aço, sem nitrogênio e com até 1.0% de  $H_2O$  (4).

As resinas alquídico-uretanas contêm pequenas porcentagens de nitrogênio (de 1.5 a 1.9%) e não possuem água. As fenólicas possuem nitrogênio na ordem de 4% e também não possuem água.

#### 2.4.2.3. PIXE

O pixe é um hidrocarbonato derivado do alcatrão, que, por sua vez, é destilado da madeira ou do carvão vegetal. O pixe não necessita de água para desenvolver suas propriedades de aglomerante.

A cura se processa a quente, durante a qual ele se funde, envolvendo os grãos de areia; durante o resfriamento, rapidamente se solidifica, fornecendo à areia uma alta resistência.

A característica principal deste aglomerante é que, durante o vazamento do metal fundido, a queima gera uma grande quantidade de gases.

Além de atuar como aglomerante, em alguns casos, também é utilizado como aditivo para melhorar as características de acabamento superficial das peças fundidas e para fornecer plasticidade ao molde (8).

#### 2.5. ADITIVOS

Os aditivos são materiais adicionados em pequenas quantidades à areia de moldagem, para promover características específicas, tais como melhorar o acabamento do molde, aumentar a resistência, etc. Alguns dos aditivos comumente utilizados são:

#### 2.5.1. SERRAGEM

Sua função principal é atenuar a expansão com aquecimento, atuando também como junta de dilatação e para melhorar a colapsibilidade da areia. Pode estar presente em teores de 0.5 a 2.0% da mistura, proporção que influi na quantidade de gases gerados pela sua queima, durante o vazamento.

#### 2.5.2. PÓ DE CARVÃO

O pó de carvão melhora o acabamento superficial do molde, aumentando sua resistência mecânica e atenua a expansão da areia com o aumento da temperatura.

Emprega-se normalmente em teores de 0.5 a 2.0% da mistura, sendo geralmente utilizado para peças de ferro fundido.

#### 2.5.3. PÓ DE SÍLICA

Aumenta a resistência a quente do molde e, preenchendo os espaços vazios entre os grãos, reduz o perigo de penetração do metal líquido, melhorando também o acabamento superficial do molde e, conseqüentemente, do fundido.

É utilizado em teores de até 3.5% da mistura.

#### 2.5.4. MOGUL

O mogul é um derivado gelatinoso do milho, utilizado para melhorar a moldatibilidade das areias, aumentando a resistência e atenuando a expansão térmica do molde. Pode ser empregado em teores de 0.5 a 1.0% da mistura.

## 2.6. PROPRIEDADES DAS AREIAS DE MOLDAGEM

As características físicas de uma areia de moldagem de terminam a qualidade do molde e do fundido dele obtido. Assim, um rigoroso controle de tais areias para a determinação destas características e eventuais correções em sua composição para melhoria de sua qualidade é operação fundamental numa fundição.

A seguir, são descritos os principais requisitos gerais para uma boa qualidade em areias de moldagem.

### 2.6.1. GRANULOMETRIA

Uma vez que o componente básico de uma areia de fundição é a areia-base e a porcentagem de aglomerante a ser adicionada depende muito estreitamente dos espaços vazios entre os seus grãos, é necessária, antes de mais nada, uma análise da granulometria.

A distribuição granulométrica e o tamanho médio dos grãos são determinados por separação de uma amostra da areia nas diversas peneiras de uma série padronizada (A.F.S., D.I.N.).

Dois métodos são utilizados para expressar a finura da areia:

- i) A curva de frequência de tamanho, expressando a porcentagem de areia retida em cada peneira, e
- ii) a curva de tamanhos acumulados, que indica a porcentagem de partículas maiores que o tamanho de determinada peneira.

A distribuição de grãos de areia afeta diretamente características importantes de um molde, como, por exemplo, a permeabilidade dos gases e possibilidade de expansão; (se altos valores destas características são requeridos, espaços vazios entre os grãos de

areia devem ser significativos, o que é obtido pela utilização de uma distribuição granulométrica restrita a uma pequena faixa de dimensões de grãos) e também do fundido nele obtido, como, por exemplo, o acabamento superficial (menor rugosidade superficial no fundido é obtida, quando a areia do molde tem uma distribuição de grãos não concentrados, isto é, quando finos preenchem espaços entre grãos mais grosseiros). Por outro lado, uma distribuição de tamanhos de grãos do tipo, por exemplo, 60% de grãos grossos, 40% de finos e 0% de médios, pode acarretar defeitos na superfície do fundido, uma vez que os grãos de areia, ao se expandirem, não encontram espaço para ocupar. Neste caso, uma distribuição adequada de tamanhos diferentes de grãos de areia é necessária para dar uma densidade ótima.

A prática indica que uma areia com distribuição de densidade ótima deve ter 90% da areia retida por quatro peneiras sucessivas (9), por exemplo, entre as peneiras 50, 70, 100 e 140, o que indicaria que os grãos maiores não ultrapassam de 0,30 mm de diâmetro e os menores não têm diâmetro inferior a 0,10 mm para 90% da areia-base. Também, a refratariedade da areia está diretamente ligada a sua granulometria: para areias constituídas de um mesmo mineral, quanto maior seu tamanho médio de grão, tanto mais refratária parece ser (9).

Quanto à dilatação térmica, areias com distribuição granulométrica muito concentrada são sensíveis aos efeitos de dilatação térmica, uma vez que o empilhamento de grãos com diâmetros semelhantes é pouco compressível. Enquanto que, se grãos pequenos se alojam entre os grandes, o empilhamento é compacto e permite pouca deformação.

A forma do grão de areia também influencia a permeabilidade de uma areia.

Em geral, as areias podem classificar-se quanto a forma de seus grãos em: redondas (de forma aproximadamente esférica), subangulares (de forma irregular, porém conservando pontos redondos na sua superfície) e angulares (de forma totalmente irregular).

Para um mesmo tamanho médio de grão e igual distribuição granulométrica, a permeabilidade decresce ao passar da forma arredondada à subangular e angular, de acordo com suas superfícies específicas.

### 2.6.2. PERMEABILIDADE

A permeabilidade é a propriedade de deixar passar ar, gases ou vapores presentes ou gerados no interior do molde, por ocasião do vazamento.

Caso os gases não achem um meio fácil de sair da cavidade do molde, poderão provocar defeitos nas peças fundidas, tais como: bolhas, porosidades, enchimentos incompletos, etc.

A permeabilidade de uma areia está diretamente relacionada com a granulometria e forma dos grãos, como foi indicado anteriormente e é determinada em laboratório pela quantidade de ar que pode passar através de uma amostra cilíndrica normalizada (A.F.S., 50,8 mm x 50,8 mm), com uma pressão também normalizada (10gr/cm<sup>2</sup>), em relação ao tempo de passagem do ar.

### 2.6.3. ESTABILIDADE TÉRMICA DIMENSIONAL

A estabilidade térmica dimensional de uma areia é medida pelo grau de dilatação ou variação dimensional, quando submetida a mudanças de temperatura e depende principalmente da sua composição. Das principais areias utilizadas em fundições, as que têm melhor estabilidade térmica dimensional (menor dilatação com o aquecimento) são as zirconitas e olivinas.

O comportamento da areia com o aquecimento depende e é consequência de modificações estruturais que ocorrem a diferentes temperaturas nos componentes. Assim, por exemplo, para a areia silicosa, cujo principal componente é a sílica, quatro diferentes estruturas são possíveis, com diferentes componentes com relação à expansão, quando submetidas a variações de temperatura:

Quartzo	- até 840°C
Tridymite	- 840 - 1470°C
Cristobalite	- 1470 - 1710°C
Silicavítrea	- mais de 1710°C

Na figura 1.2. está mostrada a expansão em volume em relação às diferentes temperaturas, para a estrutura da sílica.

Assim, é importante o conhecimento e controle das modificações estruturais e o comportamento das diferentes estruturas, ocorrendo na areia de moldagem, quando submetida às altas temperaturas de vazamento do metal líquido, sendo que alterações dimensionais não previstas podem ocorrer em peças fundidas em areais, onde tal controle não é feito.

Assim, uma areia pronta para moldagem deve ser testada, antes da utilização, em laboratório. O teste de estabilidade térmica dimensional é feito com um corpo de prova cilíndrico, o qual é submetido à alta temperatura em forno apropriado, sendo comparadas suas dimensões com as originais, antes do aquecimento.

#### 2.6.4. REFRATARIEDADE

A refratariedade da areia pode definir-se como a capacidade desta de resistir a altas temperaturas, sem chegar ao ponto de sinterização, onde os grãos começam a amolecer ou mesmo a fundir superficialmente.

MUDANÇAS DE VOLUME COM A TEMPERATURA  
 NAS ESTRUTURAS DA SILICA

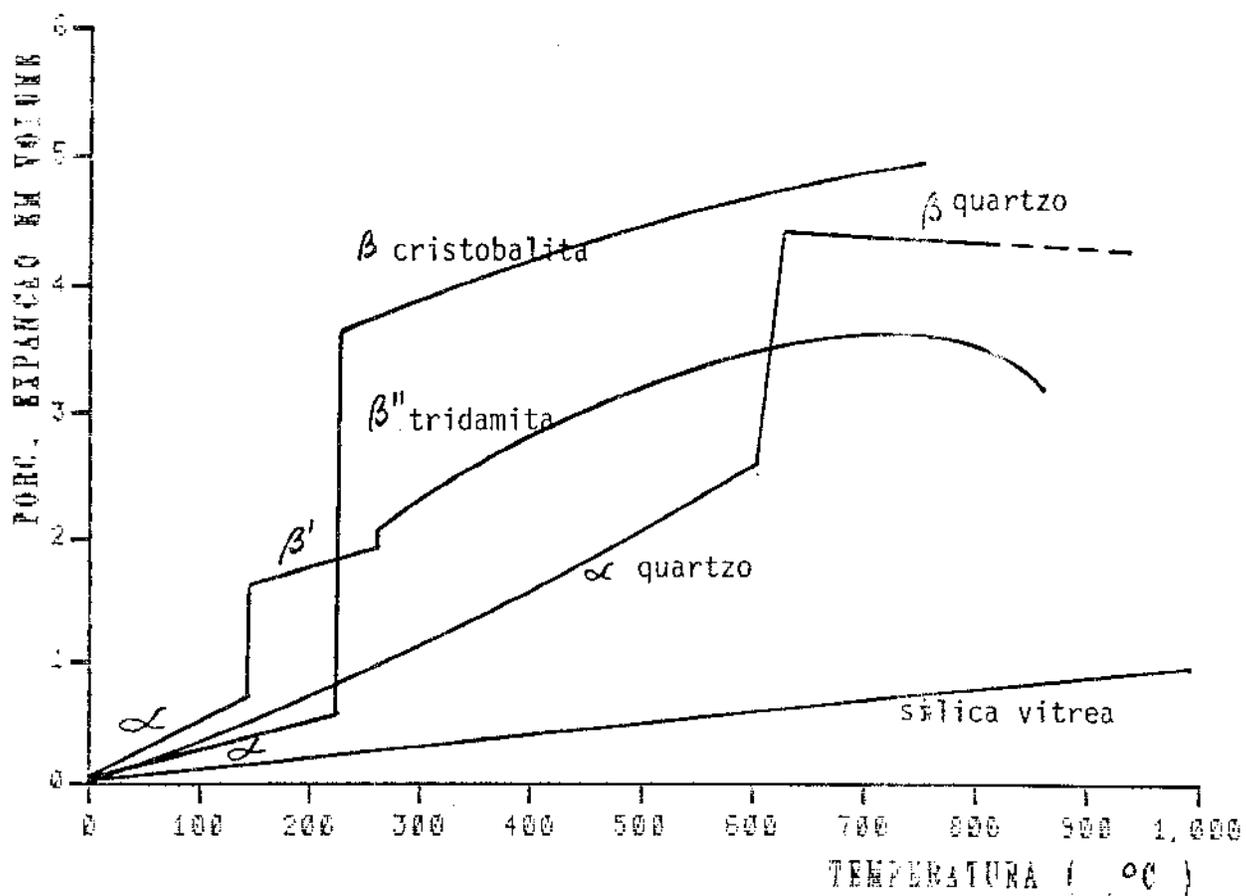


Fig. 1.2.- Mudanças de volume com a temp. nas estruturas da silica

Se a temperatura de sinterização for atingida na superfície do molde, o acabamento superficial da peça ficará prejudicado, ocorrendo penetrações do metal na parede do molde, afetando a rugosidade superficial da peça e mesmo provocando defeitos mais sérios.

A refratariedade da areia-base é de capital importância, uma vez que a areia de moldagem é constituída em maior parte desta, porém a refratariedade dos aglomerantes deve ser levada também em conta.

#### 2.6.5. ESTABILIDADE QUÍMICA

A areia de moldagem deve ter uma certa inércia química em relação ao material a fundir, isto é, não devem ocorrer reações químicas entre o metal e componentes da areia, que possam comprometer a composição e qualidade do fundido.

Um caso típico de metal que pode reagir facilmente com os materiais de moldagem usuais é o magnésio, material extremamente reativo, que, além de reagir com o oxigênio, tende a reduzir a maioria dos materiais de moldagem (9), exigindo a presença de inibidores de reação.

A inércia química do material do molde, em geral, depende de sua composição química, da composição química do metal ou liga a ser fundida e das condições no interior do molde (gases, temperatura e pressão).

#### 2.6.6. COLAPSIBILIDADE

É a propriedade do molde de ceder sob esforços mecânicos, após solidificação do metal nele contido, permitindo a contração do metal, quando da solidificação, condição importante no caso de machos, que devem ceder facilmente depois de queimados e também para moldes, para facilitar sua desmoldagem.

Se o molde e macho não forem colapsáveis, poderão ocorrer rompimento da peça e formação das "trincas a quente".

Deve-se lembrar que, por outro lado, as paredes do molde não devem ceder sob os esforços devido aos impactos ou empuxos exercidos pela massa do metal, que enche o molde. Frequentemente, a resistência admissível para que não ocorram trincas a quente é maior que a resistência mínima admissível para que não haja movimentação das paredes do molde. Neste caso, é necessário que a resistência mecânica diminua ou praticamente deixe de existir, a partir do momento em que a espessura da casca do metal solidificado seja suficiente para suportar o peso do metal ainda líquido, sem se deformar.

A colapsibilidade é testada num corpo de prova cilíndrico, a verde, e submetido às temperaturas de vazamento do líquido, o qual é submetido a esforços de compressão num ensaio padronizado.

A colapsibilidade caracterizada pelo tempo transcorrido entre o início da aplicação da força (geralmente entre 3.5 a 7.0 kg/cm<sup>2</sup>) e o momento da ruptura do corpo de prova.

#### 2.6.7. MOLDABILIDADE

É a capacidade da areia de tornar a forma do modelo e mantê-la depois de cessadas as forças externas. Depende geralmente da perfeita combinação dos ingredientes da mistura da areia.

Três fatores caracterizam a moldabilidade de uma areia:

- Escoabilidade, determinada pela maior ou menor facilidade de escorregamento dos grãos do material entre si. Deve permitir perfeita reprodução do modelo e também bom acabamento superficial.

- Consistência, medida através de resistência mecânica do material de moldagem consolidado. Deve permitir a manutenção da forma da cavidade do molde, quando este é submetido a solicitações mecânicas, devido a manuseio, transporte, etc.
- Plasticidade, avaliada pela deformação total que o material de moldagem já consolidado pode sofrer, até a ruptura, no ensaio de colapsibilidade.

#### 2.6.8. DESMOLDABILIDADE

Está caracterizado pela facilidade com que se pode retirar a peça solidificada do interior do molde ou pela facilidade com que se removem as partes do molde adesivas à peça, uma vez que a areia não deve aderir às superfícies do fundido.

Uma vez testada e aprovada a qualidade da areia de moldagem, esta é utilizada para a confecção dos moldes, nos quais é vazado o metal líquido.

Após solidificação do fundido e sua desmoldagem, o material do molde pode ser separado, recondicionado e, em alguns casos, recuperado parcialmente para posterior reutilização. No próximo item é discutida a possibilidade e processos de recuperação de areias de moldagem.

#### 2.7. PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO DE AREIA

Quando um fundido é vazado num molde de areia verde, a camada de areia adjacente ao metal vazado tem sua temperatura elevada a um patamar próximo à temperatura do metal líquido. Se esta temperatura de vazamento é maior que 573°C, para o caso de areia silicosa, esta sofrerá uma transformação, com o conseqüente aumento de volume (transformação da estrutura da sílica de quartzo para quartzo ).

Além disso, ao perder a água que dá as propriedades aglomerantes à argila, a mistura não mais possuirá propriedades de moldabilidade; ela está "queimada" e pode facilmente perder sua forma e ser desprendida do fundido.

Esta areia pode ser reutilizada, devendo, para isto, ser processada, principalmente para remover a argila queimada e, também, toda classe de aditivos utilizados, tais como: fibras de madeira, carvão, etc., devem ser removidos.

Desta maneira, o acondicionamento e recuperação de uma areia tem por finalidade devolver à areia as características que permitem novamente seu uso na moldagem.

Os processos de fundição convencionais que utilizam areias como material de molde, podem ser classificados do ponto de vista de recuperação da areia (economicamente falando) em dois tipos:

a) Processos cuja areia é recuperável:

dentro do qual podemos citar a fundição em areia verde e estufada.

b) Processos cuja areia não é recuperável:

onde podemos classificar a moldagem com areia-cimento, com resinas, por processo CO<sub>2</sub>, moldagem em casca, por cera perdida e em moldes cerâmicos.

O processo de recuperação de areia consiste fundamentalmente em dois estágios: o acondicionamento e a recuperação propriamente dita.

### 2.7.1. O RECONDICIONAMENTO DA AREIA

A areia, uma vez removida da área de desmoldagem, sofre os seguintes tratamentos:

- Separação das partículas metálicas, geralmente feita com a ajuda de separadores magnéticos que retêm as partículas de metal, eventualmente presentes.
- Separação de torrões, através de peneiramentos vibratórios.
- Resfriamento da areia, feito através da transferência de calor da areia para outro meio, sendo utilizados geralmente três métodos:
  - a) resfriamento a ar, utilizado para pequenos volumes;
  - b) resfriamento por água;
  - c) resfriamento por água, com posterior passagem de ar.

#### 2.7.2. A RECUPERAÇÃO DA AREIA

São utilizados basicamente três processos de recuperação de areias e todos eles têm como objetivo obter uma areia que possa ser devolvida ao setor de moldagem em tal condição física e química que substitua a areia nova em teores variados, dependendo do sucesso do processo de recuperação.

Na maioria dos casos, a areia recuperada entra em teores controlados na nova mistura. Para atingir tais objetivos, um sistema de recuperação de areia deveria:

- a) aplicar sobre os grãos individuais de areia usadas uma quantidade uniforme e controlada de trabalho, quebrando os equipamentos de grãos, removendo ou reduzindo a casca dos aglomerantes usados e restaurando as dimensões físicas originais dos grãos;

b) submeter a massa da areia a um processo de separação e classificação para remover da areia os detritos dos aglomerantes usados e devolver o produto recuperado com uma distribuição granulométrica aproximada à da areia nova.

Os métodos básicos de recuperação de areias são três:

i) Por via úmida

Este método utiliza um classificador de areia, utilizado para remover os finos da mesma; em seguida, a areia é levada a um lavador, semelhante a um liqüidificador, o qual desprende as camadas de material aglomerante que envolvem os grãos, por ação do choque e fricção destes, impulsionados pelo rotor, contra grãos de movimentos mais lentos na periferia do lavador.

Após esta operação, a areia é seca, classificada e resfriada, antes de nova utilização.

O processo é ilustrado na figura 1.3

ii) Por via térmica

Este sistema utiliza um forno para elevar a temperatura da areia entre 650 a 800°C, para remover carbonáceos resultantes de aglomerantes oleaginosos ou cereais que se encontrem na areia.

A areia é colocada em bandejas, com grande superfície de evaporação, no interior dos fornos.

iii) Por via pneumática

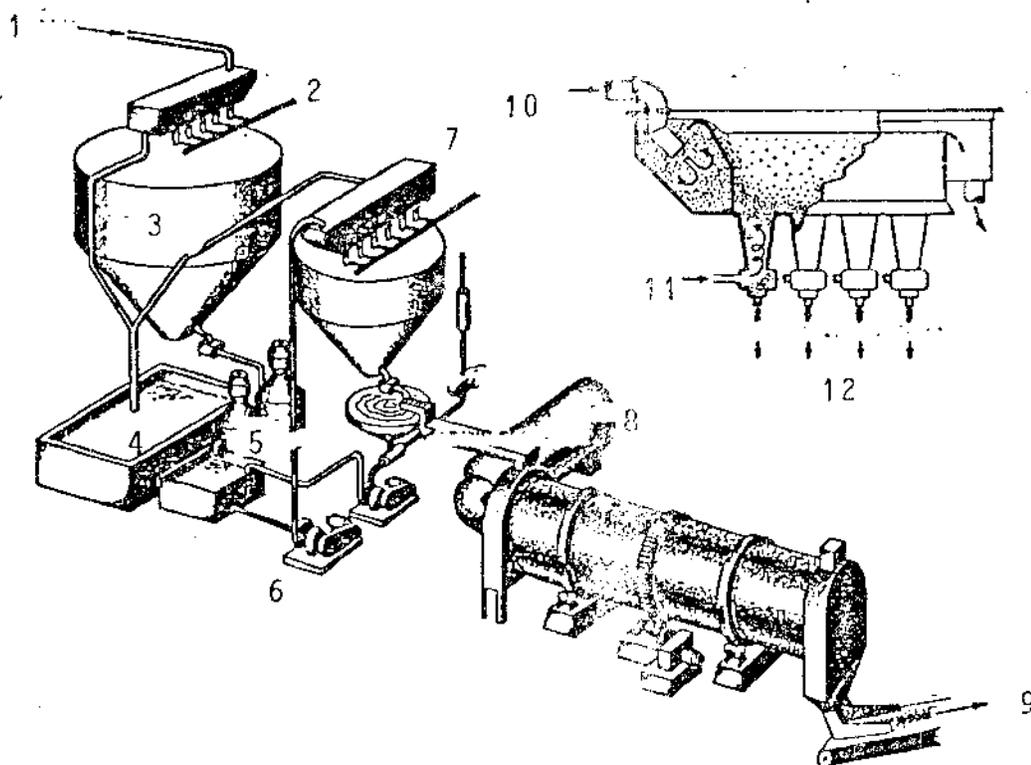
É um processo de recuperação de areias, utilizado geralmente para areias aglomeradas com argila.

Os equipamentos utilizados constam de uma célula, pela qual escorre a areia, que, soprada por jatos de ar, é chocada contra um alvo de forma cônica. Desta maneira, o material soprado se choca contra os outros grãos, eliminando, por fricção, as camadas que os envolvem.

Este método permite controle de finos e também da granulometria da areia, permitindo obter uma areia com granulometria controlada, após o processo.

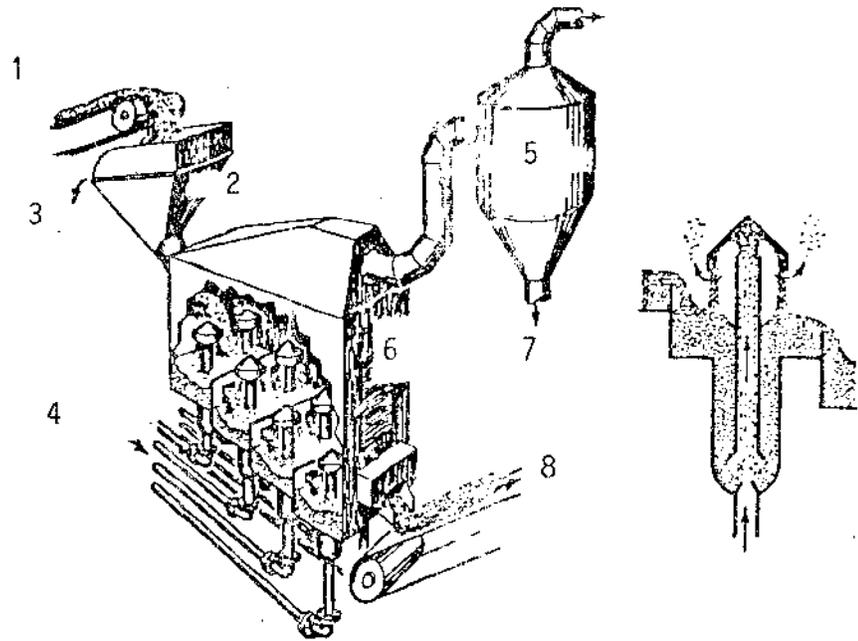
O processo é ilustrado na Fig. 1.4

Existem ainda processos mistos, que se utilizam de um ou mais dos processos descritos, como ilustrado na figura 1.5.



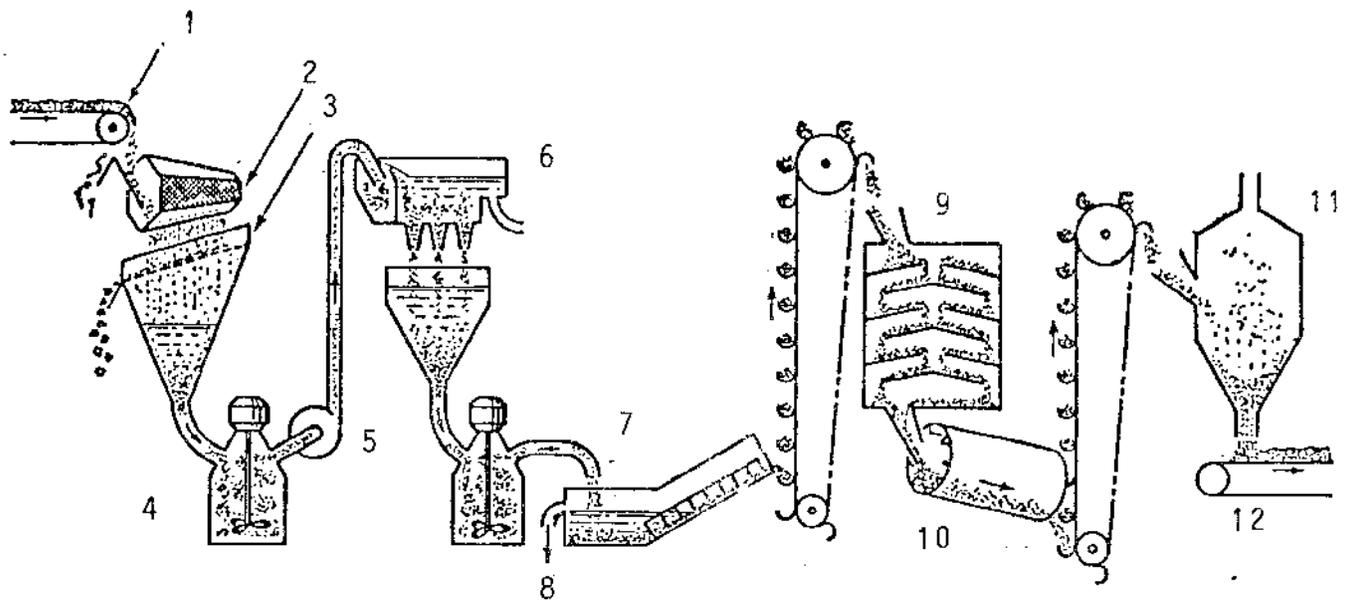
- 1.- Areia usada
- 2.- Classificador primario
- 3.- Tanque de armazenagem ( seco )
- 4.- Tanque de lama
- 5.- Lavador de areia ( depurador )
- 6.- Bomba de areia
- 7.- Classificador secundario
- 8.- Secador de areia
- 9.- Areia recuperada
- 10.- Classificador hidraulico ( entrada )
- 11.- Fluxo de agua
- 12.- Saida de areia classificada

Fig. 1.3 Processo de recuperação de areia via umida



- 1.- Areia usada
- 2.- Trituradora de grãos
- 3.- Torroes
- 4.- Ar de turbinas
- 5.- Classificador de ar
- 6.- Depurador pneumático
- 7.- Finos
- 8.- Areia recuperada

Fig. 1.4 Processo de recuperação de areia pneumático



- 1.- Polia magnetica
- 2.- Peneira ( com agua )
- 3.- Peneira raspadora
- 4.- Depurador
- 5.- Bomba
- 6.- Classificador hidraulico
- 7.- Eliminador de agua
- 8.- Saída de agua
- 9.- Forno rotativo
- 10.- Resfriador rotativo
- 11.- Classificador por ar
- 12.- Areia recuperada

Fig. 1.5 Processo de recuperação de areia combinado, pneumático e térmico.

### 3. PROCESSOS DE FUNDIÇÃO NÃO CONVENCIONAIS

No decorrer dos anos, não tem cessado a busca de processos operacionais que, afastados dos processos de moldagem convencionais, possam trazer solução para os numerosos inconvenientes com que os fundidores vem se debatendo há tantos séculos.

Pouca notícia, no entanto, se tem a respeito do processo de fundição, ou melhor dizendo de moldagem, segundo a classificação dada neste trabalho para os processos de fundição (de acordo com o método e o material empregado para a confecção de moldes). As pesquisas desenvolvidas se voltam para a obtenção de materiais de moldagem que eliminem inconvenientes provocados pela necessidade de aglomerantes: seu alto custo, sua toxicidade, dificuldade de sua separação dos grãos de areia após queima, etc.

Assim, quando se menciona processos não convencionais de fundição ou moldagem, entende-se processos de moldagem que dispensam aglomerantes, os quais são apresentados:

#### 3.1. MOLDES MAGNETICOS

Um dos processos desenvolvidos nos últimos anos é o de Moldagem Magnética, no qual o material do molde é uma mistura de areia e granalha de aço, a que, quando submetida a um campo magnético, esta adquire a coesão e resistência necessária para constituir um molde apto a receber o metal líquido.

Uma vez o metal líquido é vazado e solidificado, o campo magnético é retirado, perdendo a mistura de areia e granalha de aço a coesão, sendo feita a desmoldagem automaticamente (31).

Embora este processo tenha sido desenvolvido faz alguns anos, não existe na literatura notícias sobre aplicações a nível industrial.

### 3.2. MOLDAGEM A VÁCUO

Também um processo de moldagem onde nenhum tipo de aglomerante é utilizado; nem mesmo aditivos especiais como o caso anterior.

Neste processo recobre-se o modelo, especialmente confeccionado, com uma fina película de poliuretano, e colocada a caixa de moldagem, enche-se a mesma de areia silicosa ou de composição especial (zirconita ou cromita), submetendo-se o conjunto à ação de vácuo elevado.

O resultado é um estado de coesão entre os grãos de areia pela retirada do ar contido entre seus grãos, suficiente para permitir o vazamento do metal, mantendo-se a rigidez do molde.

Solidificada a peça, retira-se a ação do vácuo e a desmoldagem se dá espontaneamente.

Este processo de moldagem foi apresentado na Feira Internacional de Fundição de Düsseldorf em 1974, sendo utilizado atualmente por algumas firmas japonesas (31).

Não foi, porém, detetada literatura a respeito, que fornecesse dados técnicos.

### 3.3. MOLDES CONGELADOS

Ainda um processo de moldagem que não utiliza aglomerantes tem sido recentemente pesquisado: os moldes congelados. Neste tipo de molde, um certo teor de água é adicionada à areia base, conferindo-lhe moldabilidade suficiente para a confecção do molde. Passa-se ao congelamento do molde em meio refrigerador apropriado; a transformação de fase água/gelo confere alta resistência mecânica ao molde, que poderia então ser manuseado e utilizado para o vazamento do metal líquido.

A desmoldagem dar-se-ia por simples fusão do gelo contido na areia.

Apesar de aparentemente interessante e viável pouca informação também se pode detetar a respeito de moldagem e fundição.

Kita (29), analisa as características de corpos de prova obtidos com teor de 1 a 3.5% de teor de umidade: observa que a resistencia mecânica da areia aumenta com o aumento do teor de água.

O autor no entanto não mostra a viabilidade de fundição em moldes, seus testes se restringem a corpos de prova massivos, não moldes passíveis de serem preenchidos com metal líquido.

Pajak (30), analisa as velocidades de resfriamento em moldes congelados com nitrogênio líquido e chega a calcular teoricamente o consumo de nitrogênio para abaixar a temperatura da areia.

Diante da escassez de informações e da aparente potencialidade do processo de moldagem com areias congeladas, e que este trabalho se coloca com a intenção de, não só viabilizar o processo para a prática da fundição de metais, como analisar os parâmetros de controle do processo e a qualidade dos fundidos obtidos em tais moldes.

Procura-se, portanto, colocar à disposição de fundidores estudiosos e interessados na fundição de metais, um novo processo de fundição.

## CAPÍTULO 2: SOLIDIFICAÇÃO DE METAIS

Após solidificação, um metal apresenta uma estrutura interna ou microscópica e um aspecto estrutural macroscópico que dependem das características intrínsecas do metal e das condições em que se processou a solidificação.

Fatores como composição do metal, taxas de extração de calor pelo material do molde no resfriamento, entre outros, determinarão a taxa de nucleação e crescimento, bem como a morfologia dos cristais sólidos em formação, os quais, por sua vez, determinarão a forma e distribuição de vazios de contração (para metais que têm sua densidade aumentada, quando da solidificação) no fundido final.

Neste capítulo, serão apresentados modelos explicativos do fenômeno de solidificação de metais, a formação de sua micro e macroestruturas e vazios de contração, bem como tais fenômenos são influenciados pelo material do molde, no qual ocorre a solidificação do líquido. Será ainda apresentado rapidamente como tais fenômenos interferem em propriedades do produto fundido obtido.

### 1. ESTRUTURAS DE SOLIDIFICAÇÃO

#### 1.1. MICROESTRUTURAS

O aspecto microestrutural de um metal fundido depende, fundamentalmente, da sua composição, a qual, aliada a outros fatores, determina a morfologia de crescimento do sólido a partir de núcleos surgidos no líquido. Assim, podemos proceder à explicação do fenômeno da solidificação e formação de microestrutura, separando os metais em dois grupos: os metais puros e os que contêm elementos em teores significativos (o sentido deste significativo será entendido oportunamente).

Vejamos, em primeiro lugar, a solidificação de metais puros :

Segundo modelos tradicionalmente aceitos, a "estrutura" dos metais líquidos consiste, essencialmente, em um estado desordenado de átomos, ao qual surgem, esporadicamente, pequenas regiões atômicamente ordenadas segundo a estrutura cristalina do metal sólido correspondente, sendo este surgimento de natureza aleatória e estatística (19).

Essas regiões em ordenação de curto alcance são denominadas embriões de fase sólida, sendo sua forma aproximadamente esférica. Estes embriões, para poder sobreviver na fase líquida, torna-se termodinamicamente necessário que a fase líquida esteja a uma temperatura inferior à temperatura de fusão do metal, isto é, o líquido precisa estar submetido a um super-resfriamento. Isto acontece preferencialmente junto às paredes do molde, onde alta taxa de nucleação ocorre.

A velocidade de crescimento de um núcleo é também inversamente proporcional à temperatura do líquido a ele adjacente, fazendo com que o crescimento destes seja lateral, junto à interface metal/molde (onde está o maior super-resfriamento), formando rapidamente uma camada solidificada contínua, macroscopicamente plana.

No entanto, microscopicamente, esta interface é rugosa para a maioria dos metais, podendo haver a formação de protuberâncias (pela adição de excesso de átomos numa determinada posição), cujas extremidades estarão submetidas a um menor super-resfriamento que as suas bases e, portanto, terão, assim, uma menor velocidade de crescimento que estas.

Neste caso, após um certo tempo, a protuberância terá sido absorvida pela interface, a que mantém, portanto, sua planicidade.

O progresso da solidificação é dado pelo avanço desta interface no líquido, até o consumo total deste, resultando no crescimento dos diferentes núcleos para formar uma estrutura de diferentes orientações cristalográficas denominadas "grãos cristalinos" e que estão separados por superfícies atômicamente desordenadas: os contornos de grãos. A estrutura final resultante será, portanto, constituída de grãos cristalinos (macroscópicos), microscopicamente homogêneos.

A figura 2.1. (a) representa a estrutura de solidificação de um metal puro. Para metais impuros ou ligas monofásicas, após a nucleação (que ocorre de maneira semelhante à descrita para metais puros) e durante o crescimento do sólido, formações dendríticas geralmente ocorrem, pela maior possibilidade de sobrevivência de protuberâncias surgidas na interface sólido/líquido, graças à presença do fenômeno de super-resfriamento constitucional. Quando este se faz significativo, o que depende do nível de soluto e das suas condições de solubilidade e difusão no líquido, a extremidade da protuberância estará submetida a maior taxa de crescimento que suas bases, podendo não só sobreviver como facilmente ramificar-se. A figura 2.1.b representa este crescimento.

A estrutura final resultante será, portanto, formada macroscopicamente por grãos cristalinos, os quais, microscopicamente, serão constituídos de dendritas.

A formação de microestrutura de ligas polifásica, constitui assunto complexo, cuja oportunidade não se apresenta para o desenvolvimento deste trabalho, não sendo, portanto, aqui abordado.

## 1.2. MACROESTRUTURAS

Sob condições normais de solidificação, lingotes fundidos apresentam uma estrutura bruta de fusão típica,

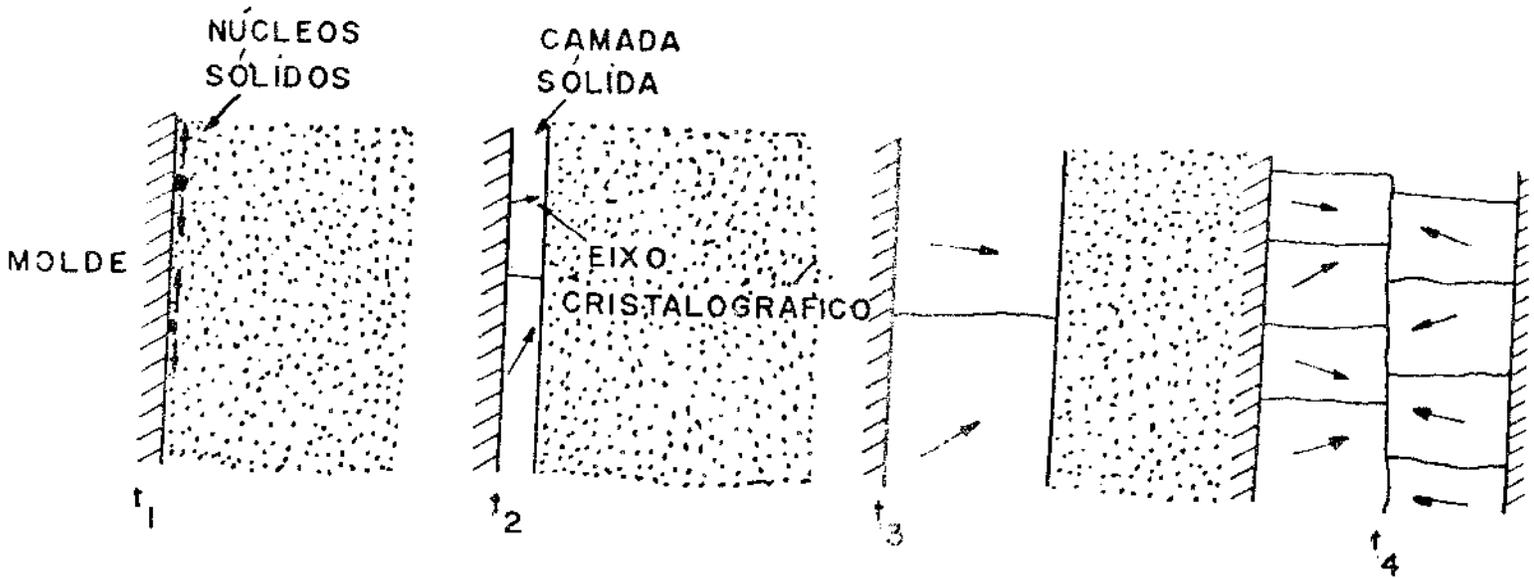


Fig. 2.1.(a).- Esquema representativo da solidificação de um metal puro

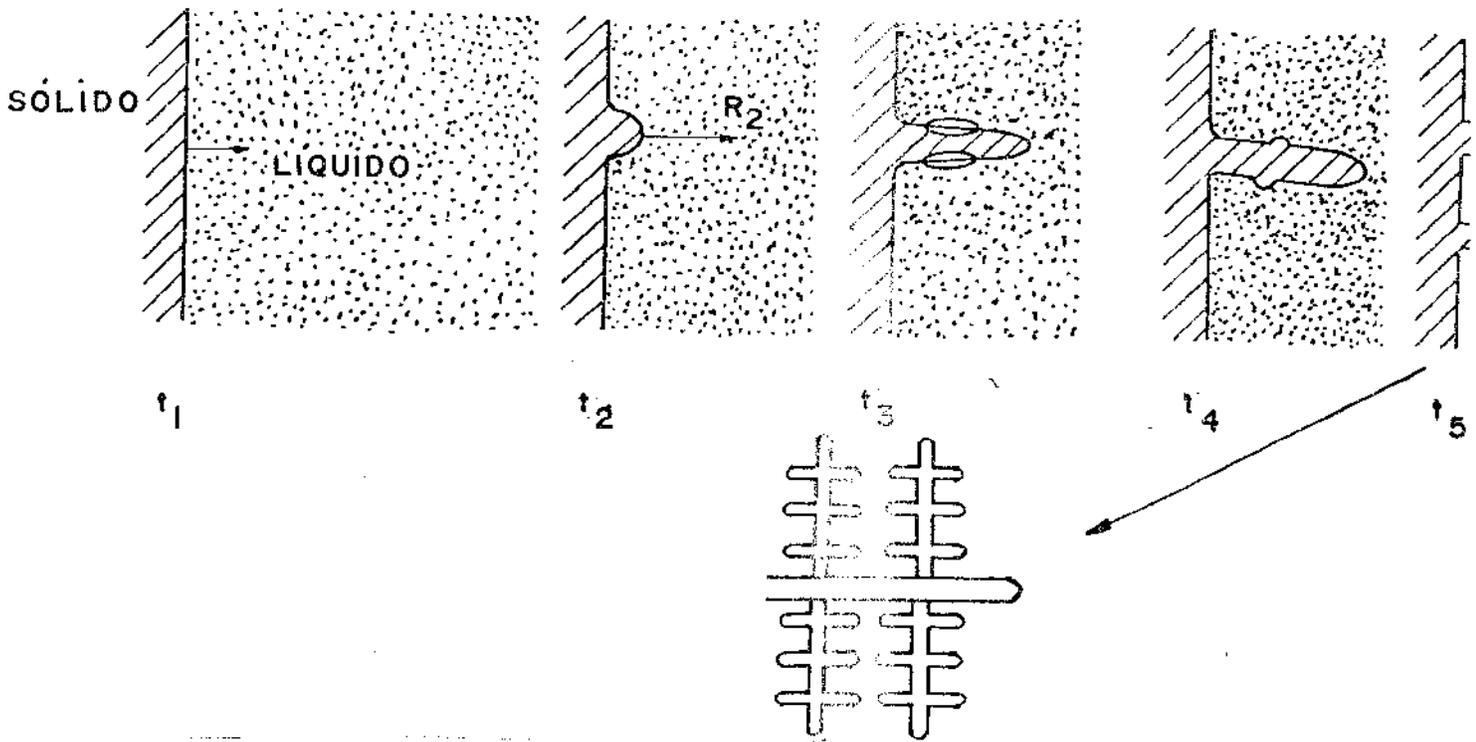


Fig. 2.1.(b) .- Esquema representativo de um crescimento dendrítico.

caracterizada por diferentes tipos e tamanhos de grãos, agrupados em zonas bem definidas, chamadas de zonas estruturais: coquilhada, colunar e equiaxial.

A figura 2.2. mostra uma estrutura típica obtida para um lingote, na sua seção transversal.

### 1.2.1. A ZONA COQUILHADA

Localiza-se na periferia da peça e é constituída por grãos finos equiaxiais, isto é, sem orientação preferencial de crescimento.

Existem diferentes teorias sobre os mecanismos de formação da zona coquilhada:

- Henzel (10), em 1937, defendia a teoria de que estes grãos são originados por uma "nucleação copiosa" em uma camada do líquido super-resfriado existente junto às paredes do molde, ocorrendo a nucleação sobre substratos de nucleação que seriam a própria parede do molde e/ou partículas presentes no líquido. Este autor, no seu mecanismo de nucleação copiosa, afirma que, no início da solidificação, deve existir uma zona de líquido com super-resfriamento necessário à nucleação, a qual estará influenciada pelas condições de transferência de calor do sistema (11):

- a) O material do molde, sendo que o maior coeficiente de extração de calor, maior volume de líquido super-resfriado, favorecendo a nucleação copiosa.
- b) O metal em solidificação, onde a maior facilidade de liberação de calor latente, maior o tempo do líquido em condições de nucleação.

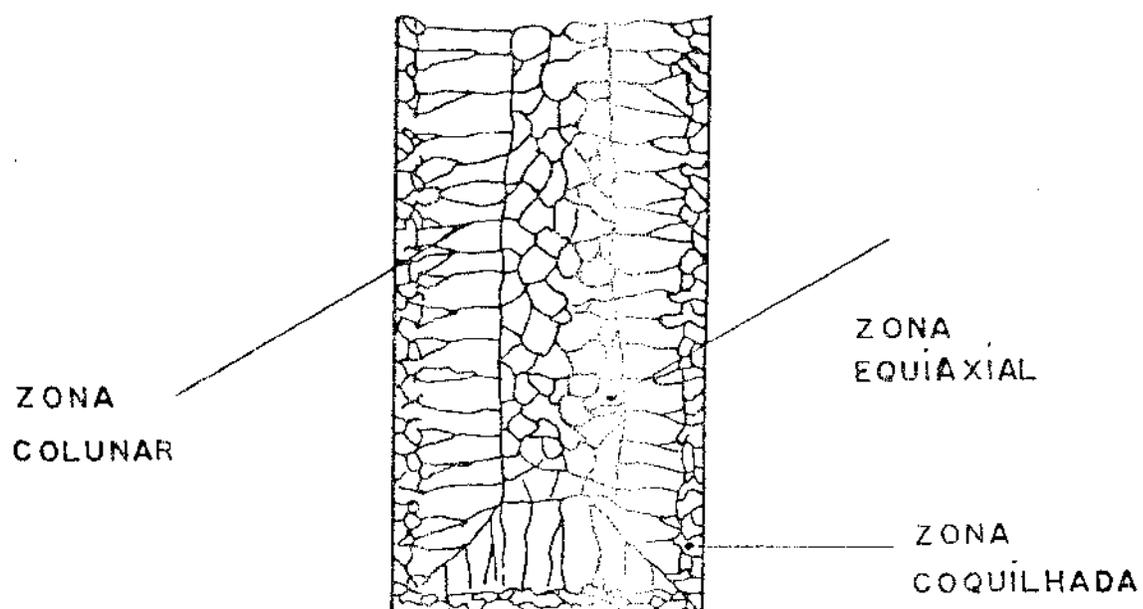


Fig. 2.2 Macroestrutura típica de solidificação de um lingote e suas três zonas estrututais.

- c) A temperatura do molde, uma vez que maior temperatura do molde, menor a taxa de extração de calor, desfavorecendo a formação de zona coquilhada.
- d) O superaquecimento do líquido, sendo que para o maior superaquecimento no vazamento, maior a temperatura no molde, desfavorecendo a formação de zona coquilhada.
- Em 1967, Bower e Flemings (12) propõem que a zona coquilhada seria formada por um mecanismo de "multiplicação de cristais", inicialmente formados numa camada de líquido próxima à parede do molde, provocada pela separação de ramos dendríticos dos cristais, como consequência de convecções no líquido.
- Biloni e Morando, em 1968 (13) verificam, através da análise das microestruturas dos grãos na zona coquilhada, que o mecanismo de "nucleação copiosa" é responsável pela formação da zona coquilhada nos moldes de alta taxa de extração e, nos de baixa taxa de extração de calor, a zona coquilhada seria obtida através de "multiplicação cristalina" provocada pela convecção do metal líquido, sendo que seria necessário que o superaquecimento do líquido não fosse excessivo para não eliminar as correntes convectivas antes da aparição dos primeiros núcleos sólidos.
- Ohno (15) propõe outro mecanismo de formação de zonas coquilhadas: seriam formadas por precipitação de grãos nucleados na parede do molde, onde existem regiões mais intensamente resfriadas, de onde seriam separados por convecção térmica provocada por flutuações de temperatura e/ou turbulências no líquido. Tal desprendimento requereria um empescoamento dos cristais na parede do molde, provocado pela presença de soluto.

Na figura 2.3. é mostrado o detalhe da formação do empescoçamento que geraria a separação do cristal da parede do molde.

Segundo o autor, condições ideais para a eficiente ocorrência do seu mecanismo são: bom contato entre molde e líquido, grande número de locais de nucleação, teor de soluto no líquido, adequado para provocar o empescoçamento dos cristais que estão se formando na parede do molde e rápida remoção destes cristais para evitar a formação de uma camada sólida estável na parede interna do molde, o que faria cessar a formação/separação do sólido.

Desta maneira, excessivamente altas taxas de extração de calor inicial desfavoreceriam a formação de zona coquilhada, ao facilitar a formação de camadas sólidas rapidamente.

#### 1.2.2. A ZONA COLUNAR

A zona colunar é constituída de grãos alongados, perpendiculares à parede do molde, seguindo a direção da extração de calor do líquido.

A formação da zona colunar é geralmente aceita como sendo resultado de um crescimento seletivo de determinados grãos coquilhados, da seguinte maneira: Walton e Chalmers (16) verificaram que, para um determinado tipo de estrutura cristalina, existem direções preferenciais de crescimento perfeitamente definidas e que os grãos colunares são formados a partir do crescimento seletivo de alguns grãos da zona coquilhada.

No início da solidificação, os cristais tendem a crescer com maior velocidade em direções laterais, como consequência da menor temperatura das paredes internas do molde e/ou adjacências, formando uma camada sólida ao longo da parede.

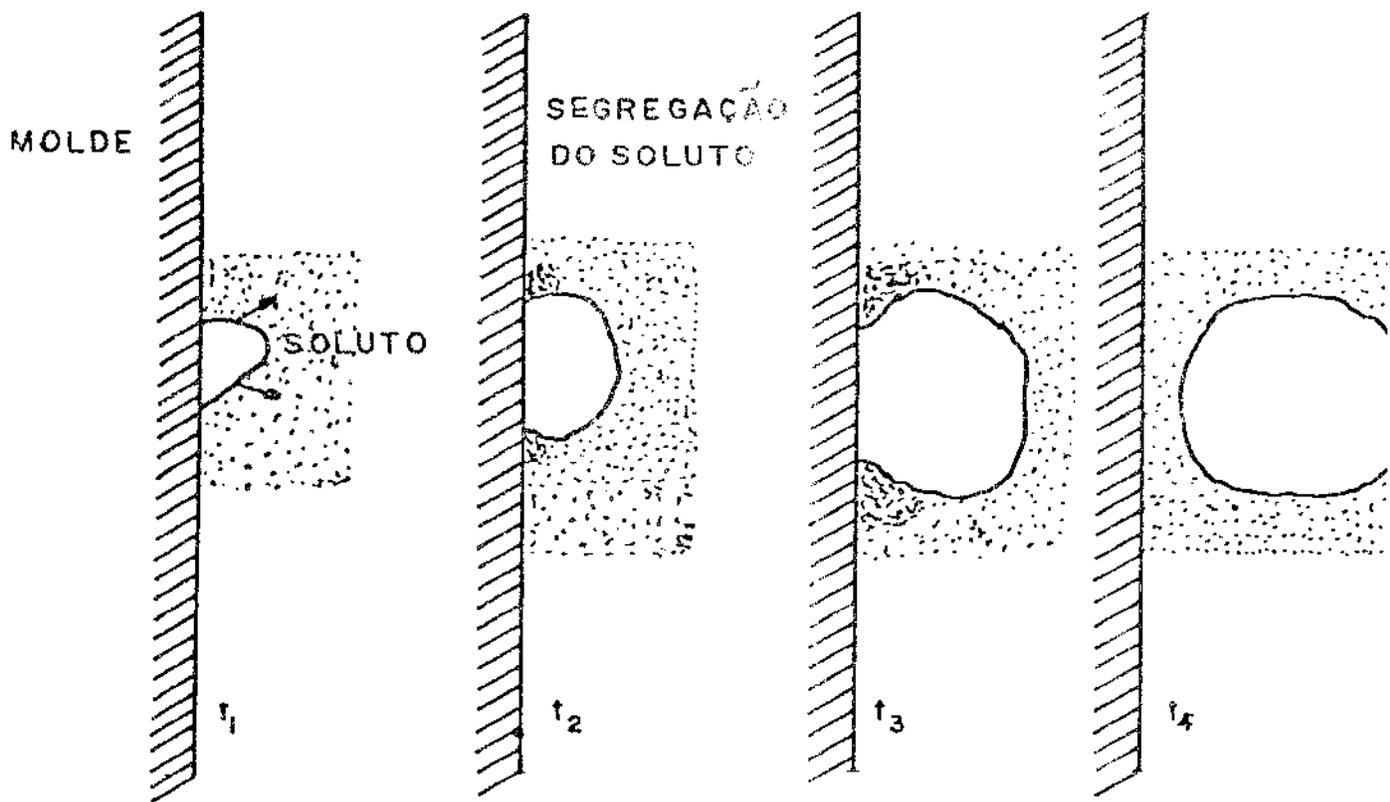


Fig. 2.3 Mecanismo de separação proposto por Ohno

Desta maneira, o sólido deverá crescer para a frente do líquido, onde os cristais que possuem uma direção preferencial de crescimento paralelo ao fluxo de calor crescerão de uma forma mais rápida que grãos vizinhos com orientação desfavorável, chegando, num determinado estágio, a suprimi-los.

Estes grãos coquilhados de crescimento mais rápido desenvolvem a zona colunar, implicando numa redução do número de cristais e aumentando as dimensões dos grãos sobreviventes. A figura 2.4. ilustra o fenômeno.

Os principais fatores que influenciam na formação da zona colunar, desta maneira, estão dados por:

- A taxa de extração de calor, através do contato térmico metal/molde e o coeficiente de transferência de calor do material do molde (17).
- A temperatura de vazamento, sendo que altas temperaturas favorecem a formação de zona colunar (11) (18) e baixas temperaturas podem formar uma zona equiaxial já nos primeiros instantes da solidificação (20).
- A presença de soluto no líquido, que pode possibilitar a nucleação de grãos equiaxiais na frente da zona colunar e por favorecer a formação de dendritas, possibilita multiplicação cristalina, desfavorecendo o desenvolvimento de zonas colunares (19).

### 1.2.3. A ZONA EQUIAXIAL CENTRAL

A zona equiaxial central se caracteriza por possuir grãos que cresceram com direções cristalográficas aleatórias, embora de dimensões maiores que os da zona coquilhada. Localiza-se no centro do lingote.

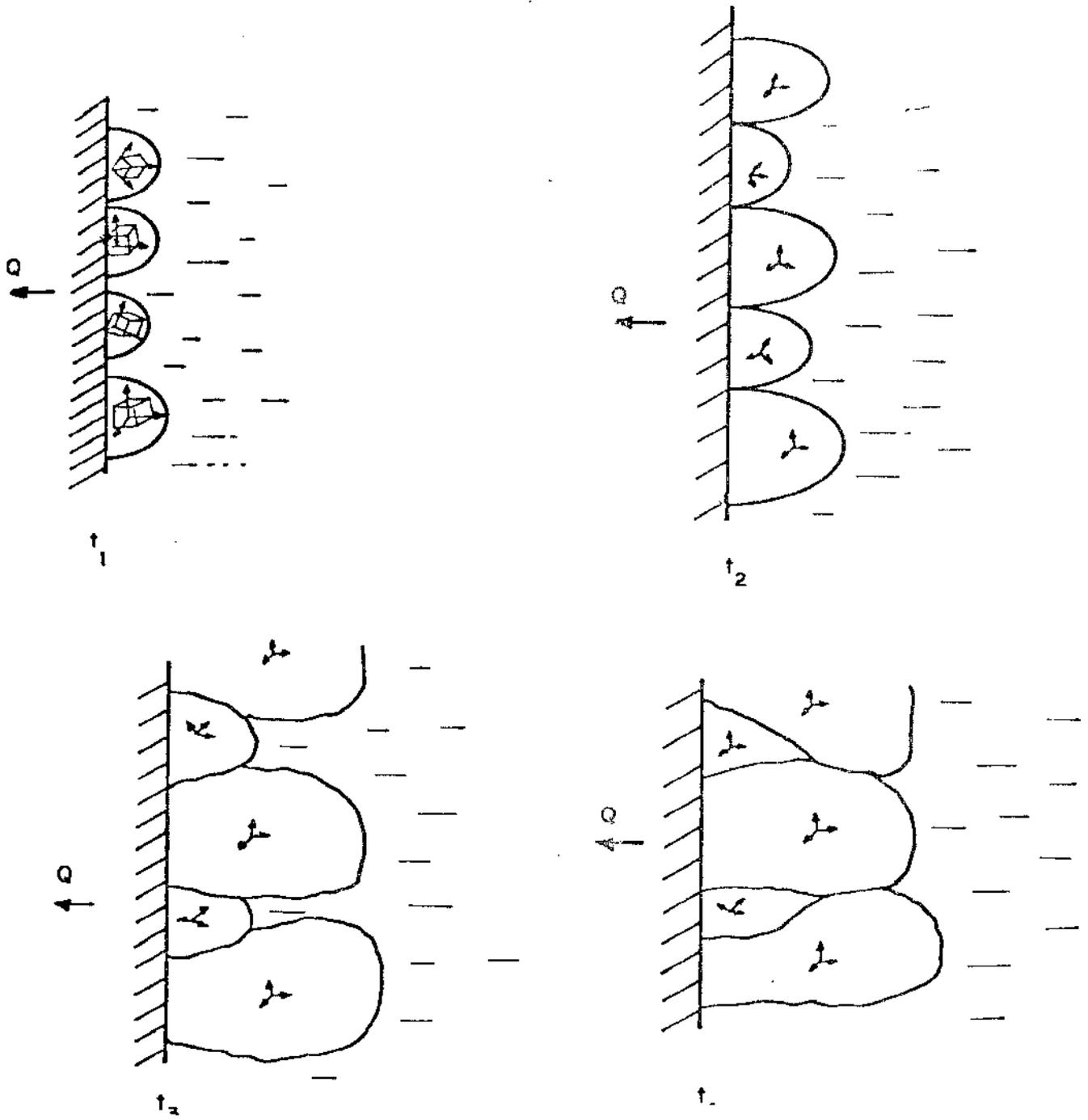


Fig. 2.4 Representação da formação da zona colunar para um sistema cfc

Os mecanismos que explicam a formação da zona equiaxial podem ser descritos por:

- Winegard e Chalmers (22) propõem que os grãos equiaxiais são nucleados diretamente no líquido, na frente da zona colunar em crescimento.
- Posteriormente, Chalmers (20) e Biloni e Chalmers (21) explicam a formação da zona equiaxial central pelo mecanismo conhecido como "big-bang", segundo a qual no vazamento são formadas na parede do molde e adjacências, grandes quantidades de núcleos coquilhados. Parte destes núcleos crescem, formando a zona colunar e parte sobrevivendo livres no líquido na frente desta zona, crescem equiaxialmente à medida que são "empurrados" para o centro do lingote.
- Jackson e Chalmers (23) apresentam um terceiro mecanismo, o chamado de multiplicação cristalina, baseado em que parte das ramificações dendríticas secundárias da zona colunar podem ser refundidas em suas raízes e, desprendidas, podem crescer posteriormente de forma equiaxial, na frente da interface colunar em avanço.
- Southin (24) propõe que os grãos equiaxiais centrais são formados a partir de grãos dendríticos e ou partes de dendritas precipitados da superfície livre do líquido para o seu interior, aí crescendo equiaxialmente e formando a zona central.
- Ohno (25)(26) utiliza a "teoria de separação" para a explicação da zona equiaxial: tais grãos seriam formados pelos cristais coquilhados surgidos na parede do molde, separados e transportados ao interior do líquido por correntes de convecção. É necessário, porém, que haja condição de sobrevivência e crescimento destes cristais no seio do líquido, a qual pode ser fornecida, segundo o autor, por reduzida temperatura de vazamento.

Pelo exposto, chega-se à conclusão de que as fontes de formação da zona equiaxial central, conforme os diversos autores, podem ser reunidas em, basicamente, três:

- seria formada por nucleação direta do líquido na frente colunar em crescimento e/ou;
- a partir da ruptura da zona colunar e/ou;
- por crescimento de cristais arrastados até o centro do lingote, originários de outras regiões do líquido.

Deste modo, a ocorrência de uma significativa zona equiaxial central depende de fatores que permitam e estimulem estas fontes de núcleos, isto é, que ao sistema sejam fornecidas:

- condições de geração de novos núcleos sólidos no seio do líquido;
- condições de arraste dos grãos desprendidos da zona coquilhada (correntes de convecção) e de partículas sólidas desprendidas da superfície livre do líquido ou da zona colunar;
- condições de sobrevivência e crescimento de grãos ou núcleos na frente da zona colunar.

Estas condições são dependentes de cada sistema específico metal/molde; por exemplo, reduzidos gradientes térmicos no líquido, os quais facilitam a sobrevivência de partículas sólidas no seu interior podem ser mais facilmente obtidas em líquidos contidos em moldes refratários; altos gradientes composicionais poderiam facilitar a nucleação na frente da zona colunar, sobre substratos ainda não operantes, etc.

Portanto, para cada sistema metal/molde uma distribuição e morfologia de grãos pode ser obtida.

Além da diversidade de micro e macroestruturas obtíveis em processos de fundição, uma outra característica do fundido, também de grande importância para a qualidade do produto, é dependente do sistema em questão, isto é, da maneira como o fenômeno de solidificação se desenvolve: a distribuição de vazios de contração.

### 1.3. OS VAZIOS DE CONTRAÇÃO

Quando os metais ou suas ligas se solidificam, geralmente sofrem uma contração no seu volume, com algumas exceções, como a do bismuto e ligas, ferro fundido cinzento e os semicondutores, que se expandem ao solidificar.

A contração dos metais acontece durante três etapas diferentes e perfeitamente definidas:

- A contração do líquido, que acontece durante o resfriamento entre a temperatura de vazamento e a temperatura de solidificação. Trata-se somente do efeito da acomodação de átomos que tem reduzida a sua energia vibracional com a redução da temperatura.
- A contração de solidificação: ao solidificar o metal, é resultado da modificação estrutural ocorrida; se no líquido os átomos tinham uma mobilidade relativamente grande e nenhum arranjo estrutural, ao passarem para o estado sólido cristalino, assumem posições definidas no reticulado, cuja distância é específica para cada elemento químico.
- A contração do metal sólido: quando o metal resfria até a temperatura ambiente, também devido à redução de energia vibracional.

A figura 2.5. mostra um gráfico típico de contração, ocorrida na massa de um lingote de um aço de baixo carbono, solidificada e resfriada. A figura 2.6 é uma interpretação esquemática do mesmo processo de solidificação, mostrando os efeitos da contração do líquido, durante a solidificação, e no sólido no volume e forma externa, produzido no recipiente idealizado.

O metal, no molde do esquema da figura 2.6 decresce de  $L_0$  a  $L_1$ , durante o resfriamento, até o ponto de solidificação. Este período denomina-se "contração líquida" e acontece quando o metal transfere seu super-

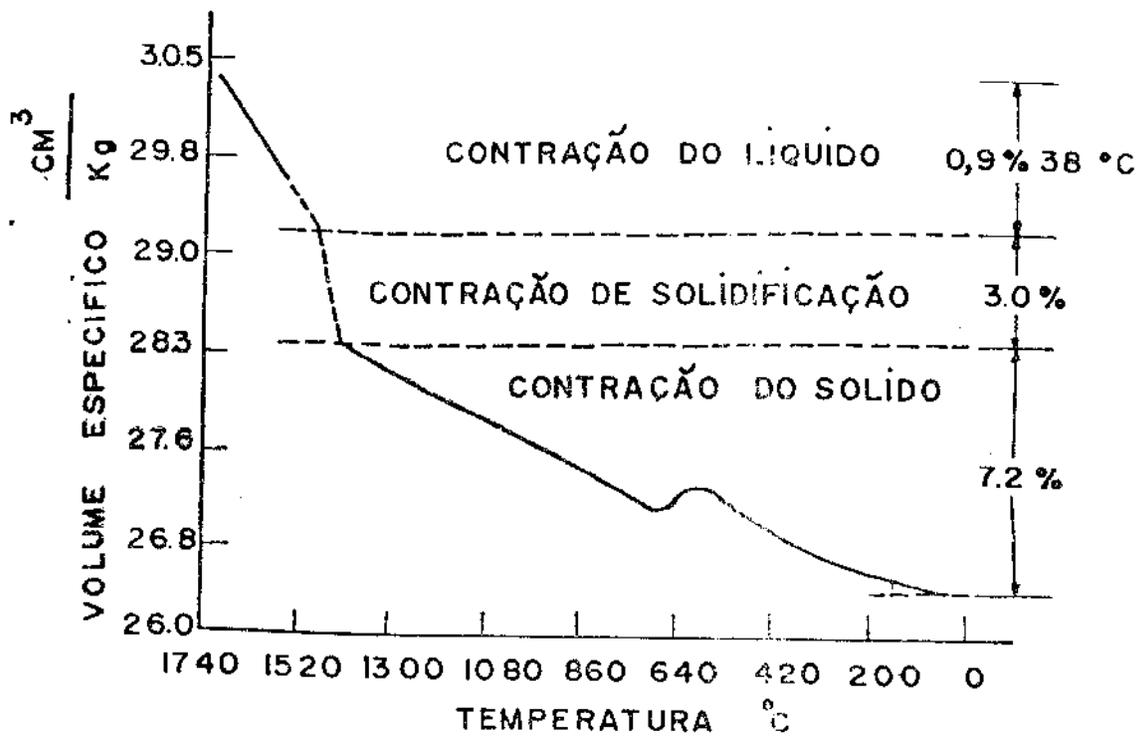


Fig. 2.5 Representação típica da variação de volume na solidificação de um lingote de baixo carbono.

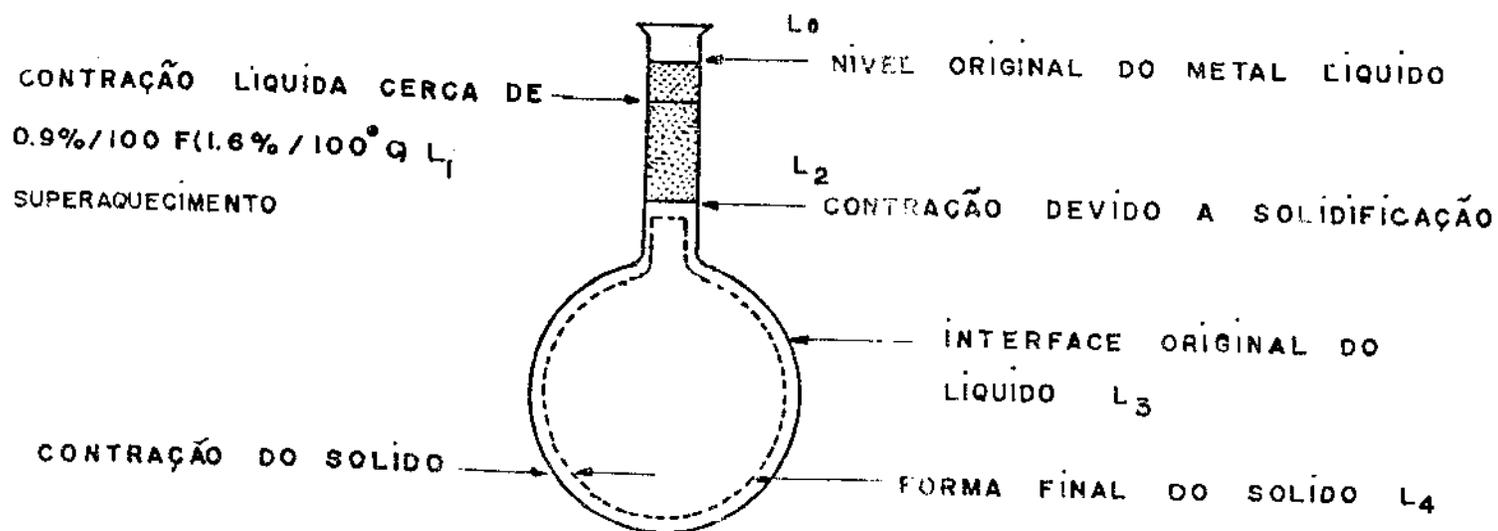


Fig. 2.6 Esquematização da variação de volume de um metal no processo de solidificação.

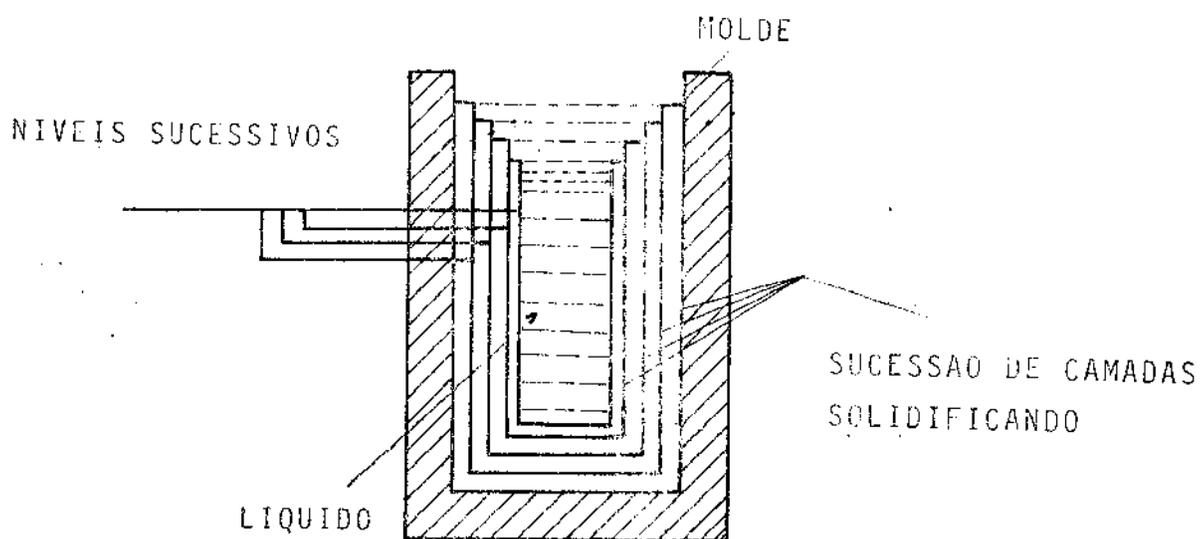
aquecimento a suas vizinhanças, decrescendo sua temperatura até o ponto onde solidifica. Esta contração líquida, nos casos de aços, é da ordem de 0,9% em volume por cada 380°C de superaquecimento (7).

Se o resfriamento acontece lento e uniformemente, contrairá durante a solidificação, levando o metal até o ponto L<sub>2</sub>, o qual corresponde, nos metais puros, à temperatura de fusão. Na maioria dos metais esta contração de solidificação corresponde à, aproximadamente, 3% do seu volume (7).

Por último, acontece a contração do sólido, obtendo-se, como consequência, um fundido levemente menor que a cavidade do molde (ponto L<sub>4</sub>), razão pela qual, na prática, os projetos dos modelos apresentarem dimensões maiores que os originais das peças.

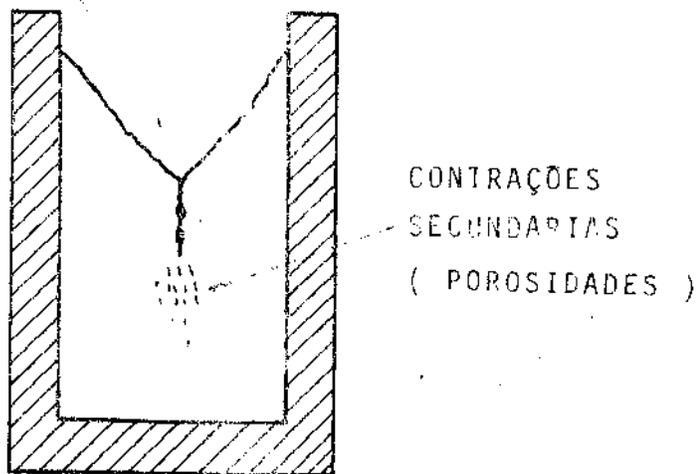
Em geral, a contração de um metal, após a solidificação, pode se manifestar de cinco diferentes maneiras (11):

- i) Rechupe localizado, que consiste de um vazio único, de forma cônica alongada, situado no centro do lingote, variando de volume, conforme a composição da liga ou o tipo de metal puro. Sua extremidade constitui o último ponto a se solidificar e sua forma é consequência do paralelismo das paredes do molde. A presença de rechupes em peças fundidas pode ser evitada pela utilização de alimentadores corretamente dimensionados e posicionados, em geral associados a uma solidificação direcional, que provoque o fluxo do metal do alimentador à região a ser alimentada.
- ii) Contração unidirecional; quando da solidificação unidirecional, a partir da base do lingote, toda a contração de solidificação é traduzida por uma redução na altura do lingote, resultando um fundido com superfície aproximadamente plana.



( a )

RECHUPE



( b )

Fig. 2.7.(a) Solidificação sucessiva das camadas num lingote  
2.7.(b) Rechupe típico num lingote, e porosidades localizadas.

- iii) Cavidades internas: consequência da formação de uma camada sólida simultânea da superfície livre do líquido e do líquido em contato com as paredes do molde, que origina uma cavidade no interior, sendo a última região a solidificar.
- iv) Microporos: são vazios de contração distribuídos por todo o volume sólido, provenientes de alimentação deficiente em regiões interdendríticas.
- v) As porosidades superficiais: formadas perto da superfície do fundido, como consequência de pressões negativas provocadas pela rápida solidificação do líquido interdendrítico na direção oposta às paredes do molde.

O fenômeno de contração que acompanha a solidificação influi diretamente na qualidade e propriedades do fundido, uma vez que, como visto, provoca o aparecimento de vazios.

A maneira como estes vazios de contração se distribuem no fundido depende de fatores intrínsecos do metal (sua composição, principalmente) e das condições de solidificação. De uma maneira geral, pode-se dizer que depende de como se processa o crescimento do sólido. Assim vejamos:

a) Interface de crescimento plana

Durante a solidificação, primeiro é formada uma casca em contato com a parede do molde, devido às condições de resfriamento impostas pelas paredes (as quais variam de acordo com o material do molde); esta camada se desenvolve progressivamente a partir do líquido, que vai tendo seu nível diminuído progressivamente, até que todo o metal fundido seja solidificado, processo denominado de solidificação progressiva ou direcional. O resultado de tal processo é a formação de um único rechupe cônico, com suas paredes formadas pela redução progressiva do nível de

líquido, durante a solidificação. Seu vértice seria a última região a solidificar.

A figura 2.7.(a) mostra a solidificação progressiva de um lingote de aço de baixo carbono, representando esquematicamente a sucessão de "camadas de solidificação".

A figura 2.7.(b) representa o evento final de solidificação de um lingote, com a formação do vazio de contração localizado, denominado "rechupe", e os não localizados (porosidades).

Este tipo de rechupe único, localizado, ocorre em metais/condições de crescimento de interface plana ou pouco ramificada. Geralmente, é o resultado de reduzidos gradientes composicionais e térmicos, durante a solidificação.

#### b) A interface de crescimento dendrítica

Para ligas a interface sólida/líquida cresce com estrutura dendrítica, existindo na frente da interface sólida uma região de sólido + líquido, chamada de "zona pastosa".

A espessura da zona pastosa depende principalmente da composição do metal (a maior concentração de soluto, maior a tendência de formar dendritas); da velocidade de solidificação (um aumento da velocidade pode aumentar a tendência à degeneração da interface, criando dendritas) e, do estado de convecção no líquido, para redistribuir o soluto.

Em metais que apresentam, ao solidificar, uma zona pastosa extensa, o vazio de contração é distribuído por todo o volume do material, não ficando concentrado num único rechupe final, possibilitando a retenção de vazios pequenos, na forma de poros, entre as dendritas. Isto ocorre pela impossibilidade de alimentação, pelo metal líquido, de vazios que se formam entre braços dendríticos, pelo crescimento e engrossamento destes.

Este mesmo tipo de distribuição de vazios pode ser apresentado por metais puros que possuam microestrutura dendrítica, a qual é formada pela degeneração da planicidade da interface de solidificação, pela ocorrência de inversão térmica junto à interface.

## 2. INFLUÊNCIA DO MOLDE NA ESTRUTURA

Como visto anteriormente, na seção 1.2. deste capítulo, diversos são os fatores que influenciam na formação de zonas estruturais. Desde o ponto de vista das influências fornecidas pelo molde, podemos citar:

- 2.1. O material do molde, sendo que moldes de alto coeficiente de extração de calor provocam um grande volume de líquido superesfriado próximo as suas paredes, favorecendo a nucleação copiosa (11) e, desta maneira, favorecendo a formação da zona coquilhada.

Também um molde de alto coeficiente de extração de calor favorece a formação da zona colunar, uma vez que existe melhor contato térmico metal/molde e maior coeficiente de transferência de calor do material de molde, o que resulta numa alta direcionalidade no fluxo de calor que é retirado (17).

Esta condição de alto coeficiente de extração de calor pode, ademais, auxiliar o coquilhamento inicial da formação da zona equiaxial central, uma vez que é incentivado o mecanismo do "big-bang" (onde núcleos coquilhados são formados nas paredes do molde e numa região de líquido adjacente a ela) e também o da separação, de Ohno (onde os grãos equiaxiais seriam formados nas paredes do molde e, por ação de correntes de convecção, são separados da parede e levados ao interior do líquido).

No entanto, excessivamente altos valores do coeficiente de extração de calor podem prejudicar a formação desta zona equiaxial, pois pode ocasionar a rápida formação

de uma camada sôlida estável na parede do molde, fazendo cessar a "geração de cristais" proposta por Ohno.

- 2.2. A rugosidade das paredes internas do molde, que prejudica o coquilhamento e, como consequência, a formação da zona equaxial, segundo Prates e Biloni (14).

No entanto, para Ohno (25), a presença de rugosidade é fundamental para o impedimento da formação da camada sôlida estável, logo no início da solidificação; tal camada faria cessar o fornecimento de cristais para a zona equiaxial.

- 2.3. O coeficiente de transmissão de calor ( $h_i$ ), sendo que, este coeficiente de transmissão de calor da interface metal/molde condiciona a quantidade de núcleos formados em contato com a superfície do molde e, para determinados valores do mesmo, torna inoperante o mecanismo de multiplicação cristalina na formação da zona coquilhada ou pode aumentar a multiplicação de grãos da zona coquilhada (14).

### 3. INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA NAS PROPRIEDADES DOS METAIS

É fato conhecido que as características de um material dependem, de uma maneira geral, da facilidade de movimentação de planos atômicos e defeitos cristalinos e que, portanto, dependem da estrutura do material: a dimensão e forma de seus grãos (densidade de contornos, as que constituem regiões "defeituosas", e freqüência de variação de orientação cristalográfica, ambas aumentando com a redução da dimensão de grãos), dimensões e distribuição de precipitados, fases segregadas, poros, defeitos estruturais e pontuais, espaçamento interdendrítico, quantidade de ramificações, etc.

Restringindo o campo de análise à macroestrutura, citaremos alguns exemplos da relação estrutura versus propriedades de um metal, desde o ponto de vista das dimensões do grão:

- Cibula (6) comenta que fundidos com estruturas predominantemente colunares apresentam melhores propriedades magnéticas do que com estruturas equiaxiais. O mesmo autor nota que materiais com granulometria fina menor temperatura de recristalização, após deformação em trabalho, bem como um menor tamanho final do grão recristalizado, uma vez que uma grande quantidade de novos grãos é nucleada nos contornos antigos.

Ainda nota que materiais com granulação grosseira ou colunar, atenuam vibrações ultrassônicas, tornando o material insensível a métodos de análise que utilizam tal método.

Quanto às características mecânicas de um fundido e suas relações com a estrutura do material, é assunto ainda não totalmente explorado e explicado, apesar de se tratar de antigo tema de preocupação de diversos autores.

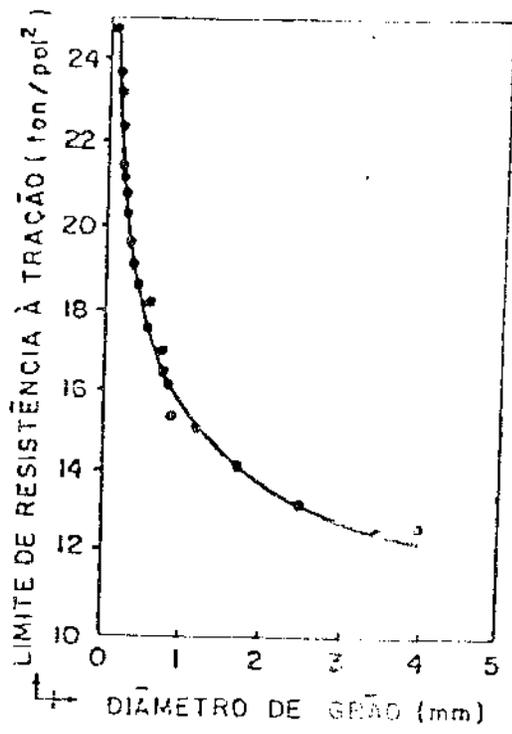
Já, em 1949, Libula e Ruddle (28) publicaram um trabalho relacionado com o limite de resistência e alongamento de ligas de alumínio com o tamanho de grão da estrutura equiaxial obtida.

Seus resultados, mostrados na figura 2.8, indicam um aumento do limite de resistência à tração e do alongamento com a redução do diâmetro médio de grão equiaxial em estruturas de Al - 4.5% Cu, sendo que, conforme os autores, estes resultados seriam consequência da redistribuição de cavidades de contração ocorridas ao se refinar os grãos.

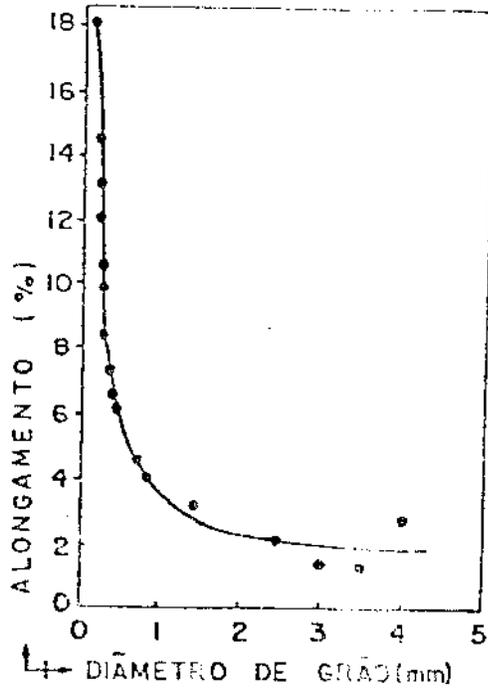
Mais tarde, surge uma nova teoria - a das discordâncias e sua facilidade de movimento dentro da estrutura como sendo o fator primordial na determinação de propriedades mecânicas dos materiais, que tenta explicar a influência do tamanho de grão nas propriedades mecânicas; estruturas de grãos de pequenas dimensões significam estruturas com alta densidade de contornos e, portanto, de barreiras ao livre movimento de discordâncias e outros defeitos, aumentando o limite de resistência do material, isto é, o nível de solicitação necessária ao seu rompimento.

Tal teoria, no entanto, não se mostra adequada para explicar o aumento do alongamento de ligas Al-Cu com a redução de diâmetro dos grãos, segundo o observado por Libula e Ruddle. Neste caso, é de supor que a distribuição de cavidades de contração seja fator preponderante.

Pelos exemplos citados, fica evidente a dependência das propriedades mecânicas que um material apresenta, com relação à maneira como o sólido é formado, as zonas estruturais resultantes, a distribuição dos vazios de contração. Procura-se, portanto, neste trabalho, tais aspectos quando da solidificação de lingotes em moldes congelados, com o objetivo de se poder analisar suas características de qualidade.



(a)



(b)

Fig. 2.8 Influência do tamanho de grão no limite de resistencia ( a ) e no alongamento ( b ) conforme Cibula & Ruddle: (28)

## CAPITULO 3: MATERIAIS E METODOS

### 1. MATERIAIS

#### 1.1. AREIAS

Nas experiências foram utilizados 2 tipos de areias, ambas silicosas, com granulometria 90-100 AFS (fina) e 45-55 AFS (grossa), do tipo comercial, para fundição. (especificação do fornecedor).

As areias possuíam, na sua origem, uma umidade de 0,01 a 0,03%, medida no próprio laboratório de fundição, após pesagem antes e depois de secagem em forno a 110°C, de 100gr de amostra. Foi utilizada balança analítica para a pesagem.

Previamente à utilização, as areias foram analisadas com relação à distribuição granulométrica, segundo descrito em item posterior, em peneiras padronizadas.

#### 1.2. AGLOMERANTES

O processo de moldagem investigado utiliza água como aglomerante, não sendo utilizado nenhum outro aditivo.

Apenas como referência para análise do comportamento dos moldes propostos e da estrutura dos fundidos neles obtidos, foram confeccionados moldes contendo resina furânica como aglomerante, nas proporções indicadas pelo fabricante.

#### 1.3. METAIS

Foram utilizados dois metais não ferrosos, Alumínio e Chumbo, comerciais, com teor de pureza de 99,6% e 99,0%, respectivamente. As temperaturas de vazamento utilizadas foram 700°C para o Alumínio e 360°C para o Chumbo; isto é, aproximadamente 10% acima da  $T_f$ , respectivamente.

#### 1.4. MEIO RESFRIADOR

Como meio resfriador para congelar os moldes, foi utilizado nitrogênio líquido, à temperatura de  $-195^{\circ}\text{C}$ .

#### 1.5. INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE TEMPERATURA

Para medidas de temperatura das areias foram utilizados termopares de Cobre-Constantan, e para medições de temperatura dos metais, termopares de Cromel-Alumel.

Foram obtidas Curvas de Resfriamento dos moldes no meio refrigerador, e Curvas de Solidificação do líquido, pela conexão dos termopares apropriados em registradores tipo Yokogawa.

Para todas as curvas foi utilizada a mesma escala de velocidade do papel no registrador: 6cm/minuto.

### 2. MÉTODOS UTILIZADOS

#### 2.1. CONFECÇÃO DOS MOLDES DE AREIA

Foram obtidos moldes em diferentes condições: variou-se, para cada tipo de areia utilizado, o teor de água adicionado (2,4 e 6% em peso da areia), e a temperatura de congelamento ( $-50$ ,  $-70$ ,  $-90$  e  $-110^{\circ}\text{C}$ ).

A água era misturada à areia seca, manualmente, por cerca de 2 minutos. Em seguida era introduzida em moldes de aço, cilíndricos, de diâmetro interno 60mm e 62mm de altura, com espessura de parede de 5mm.

Os moldes de aço possuíam uma cobertura interna de chapa de cobre, de espessura de 0,1mm, para facilitar a desmoldagem do molde de areia congelado.

A areia era introduzida no cilindro, sendo socada manualmente até formar uma base de aproximadamente 15mm; colocava-se o macho e preenchia-se os espaços ao seu redor, constituindo as paredes da lingoteira a ser congelada.

Na parte superior do molde de areia, era introduzido um termopar de Cobre-Constantan, a aproximadamente 20mm de profundidade, entre o macho plástico e a parede do molde de aço (a 7mm da parede externa).

O molde resultante, de areia congelada, tinha uma cavidade de  $\varnothing 32 \times 45$ mm, e espessura de parede de 14mm.

A figura 3.1 mostra o processo de moldagem e as dimensões dos moldes congelados obtidos.

Foram obtidos moldes de areia com resina furanica para efeito comparativo de propriedades de moldes e resultado do fundido obtido, em termos de qualidade e estrutura.

As dimensões dos moldes de areia com resina foram as mesmas dos moldes congelados. O teor de resina utilizado na mistura foi de 25% utilizando 0,4% de catalizador. O tempo de cura foi de 1 hora.

## 2.2. TÉCNICA DE CONGELAMENTO DOS MOLDES

Os moldes de aço contendo as lingoteiras de areia eram introduzidos numa caixa retangular contendo nitrogênio líquido, sendo submergidos no nitrogênio até uma altura de 50mm (deixando livres cerca de 12mm na parte superior). O nitrogênio, assim, não entrava em contato direto com a areia.

Os termopares eram ligados aos registradores, e logo após atingida a temperatura desejada, eram retirados da caixa para a desmoldagem e vazamento.

Em todos os casos, com o intuito de reduzir o consumo de nitrogênio, foram congelados 2 moldes de cada vez. As temperaturas utilizadas foram -50, -70, -90 e -110°C.

A figura 3.2 esquematiza a técnica de congelamento.

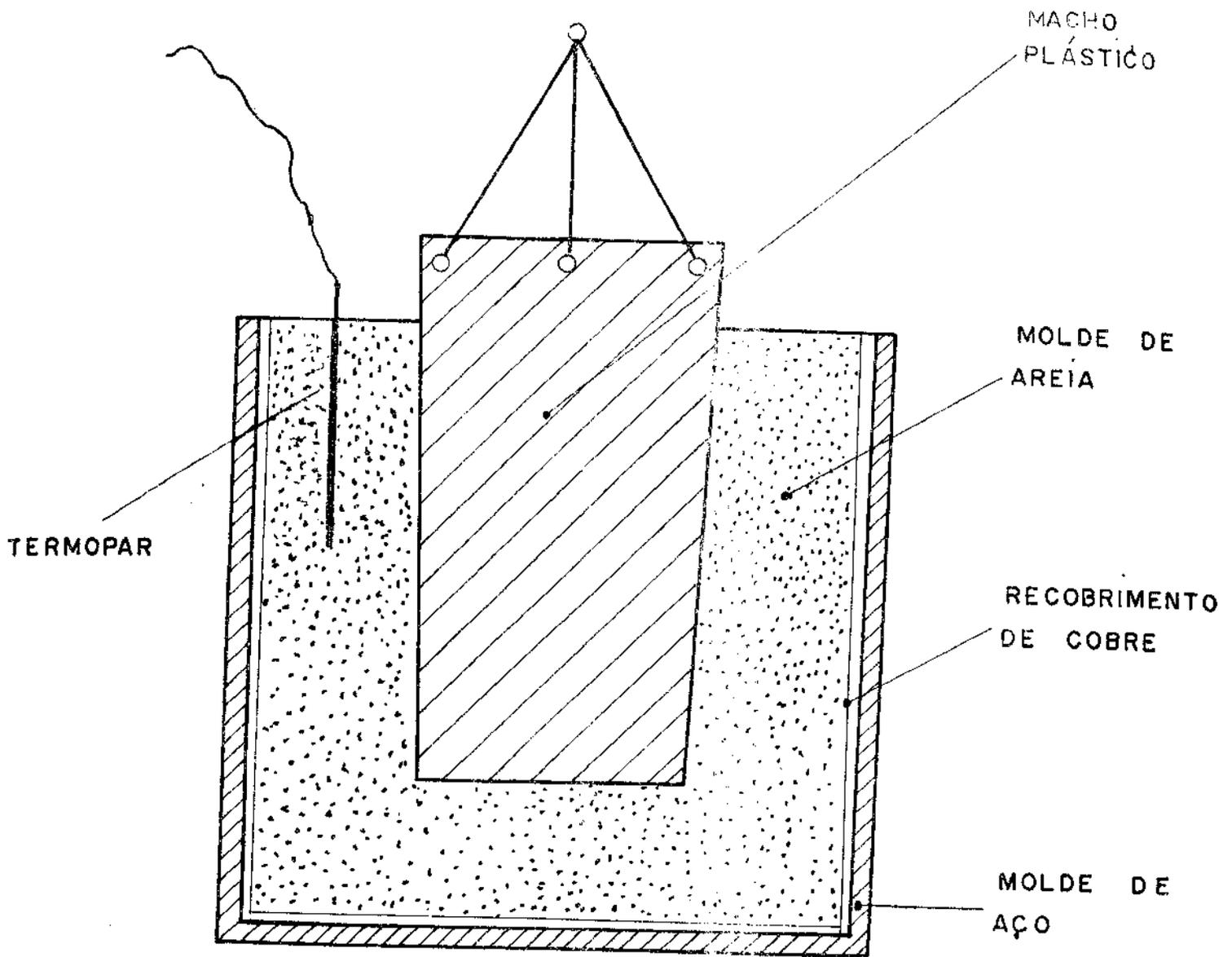


Fig: 3.1.a - Esquema mostrando o método de confecção do molde

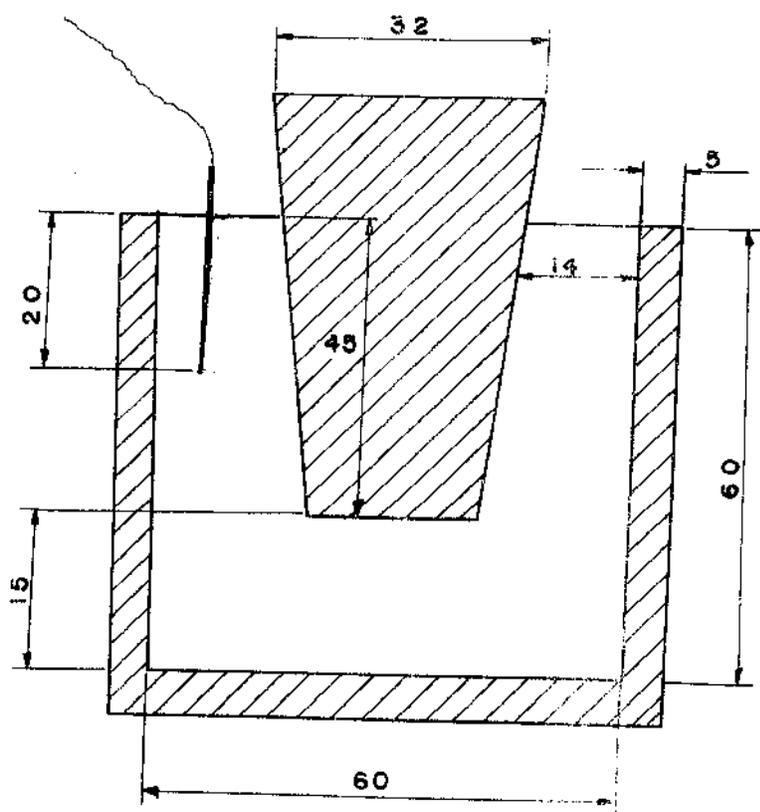


Fig. 3.1.b - Esquema representando as dimensões do molde

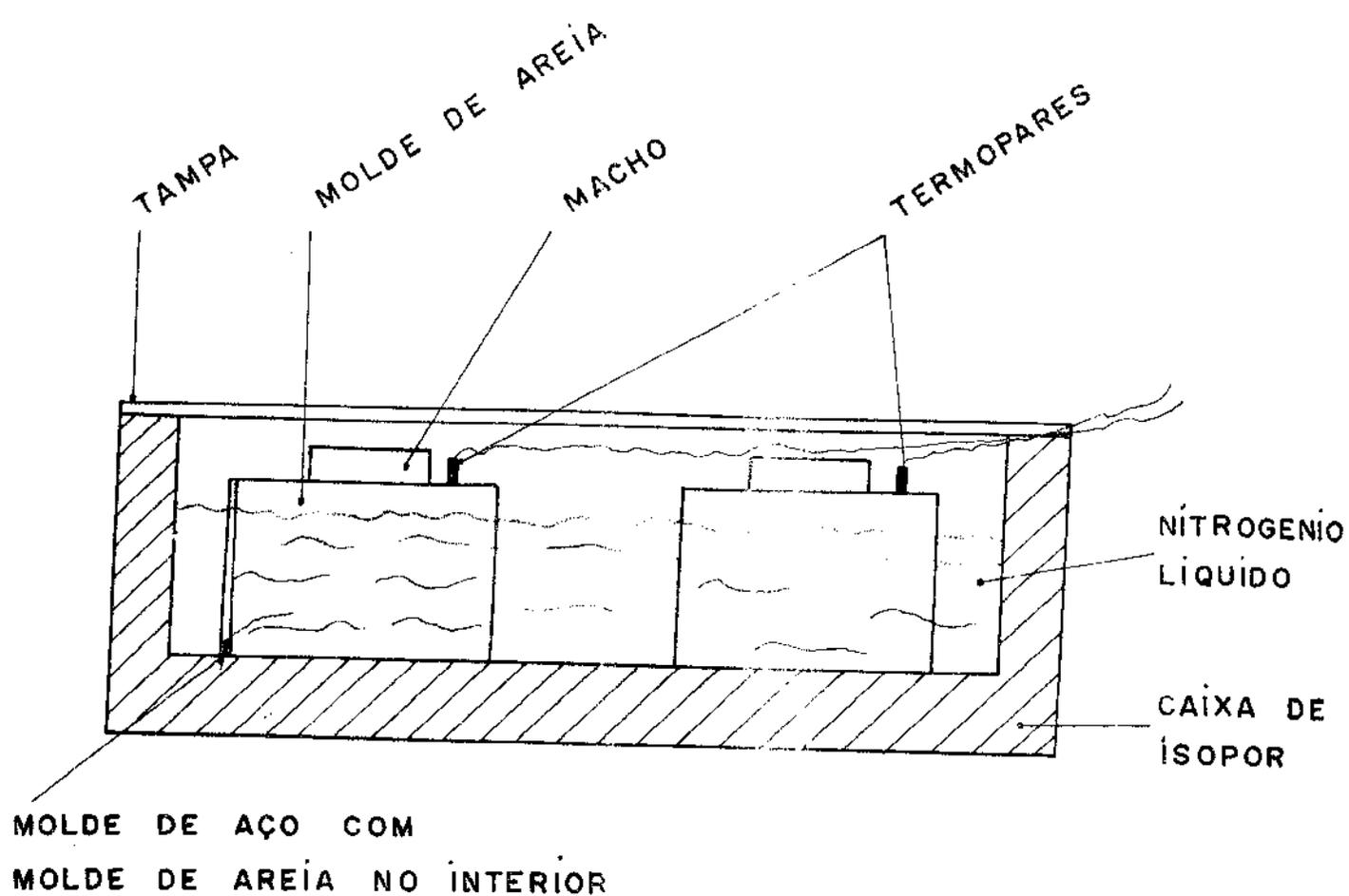


FIG 3.2 - METODO DE CONGELAMENTO DOS MOLDES

Uma vez o molde de areia tenha atingido a temperatura necessária (ao redor de 300°C abaixo da temperatura na qual seria feito o vazamento), o molde de aço contendo a lingoteira de areia era retirado da caixa de isopor. O molde de aço era retirado manualmente, abertas as duas metades e as chapas de cobre, sendo retirado o macho. O molde então era colocado sobre uma chapa de amianto, sendo inserido um termopar de Cromel-Alumel na cavidade (no centro, a uma altura aproximada de 20mm), estando pronto para receber o metal líquido.

### 2.3. FUSÃO E VAZAMENTO DO LÍQUIDO

As fusões dos metais foram feitas em cadinhos de carvão de silício (SiC) aquecidos em mufla (o Chumbo) e forno elétrico tipo poço, de 7KW de potência (o Alumínio).

O controle da temperatura do vazamento do metal era feito em conjunto com o da temperatura do molde de areia (descongelando o ar), sendo feitos todos os vazamentos a 360°C (Chumbo) e 700°C (Alumínio), com as respectivas temperaturas do molde (-50, -70, -90 e -110°C).

Foram devidamente registradas as curvas de tempo de descongelamento do molde de areia (tempo desde o início do vazamento até ir a 0°C), e tempo de solidificação do metal neles contido.

### 2.4. PREPARO DE MACRO E MICROGRAFIAS

Os lingotes obtidos nos vários moldes foram cortados longitudinalmente para polimento e ataque metalográfico. Análise da macro e microestrutura de solidificação foi processada, para verificação da influência da cinética de resfriamento nas dimensões dos grãos obtidos, e para verificação da distribuição de reclusões e poros. Para análise micrográfica, escolheu-se uma região de 1,5 x 1,5 cm, no centro da seção longitudinal do lingote, a partir de 3 mm de sua superfície inferior.

Nesta região foi feito ataque eletrolítico.

Neste processo, o metal (Alumínio ou Chumbo) constitui o ânodo da célula eletrolítica e, na operação acontece a dissolução do mesmo, de modo tal que as irregularidades da superfície desaparecem, na medida que a operação progride.

O polimento eletrolítico permite determinar a estrutura granular do metal por diluição preferencial dos contornos de grão, uma vez que a sua atividade é diferente do interior do grão, devido a acumulação de defeitos cristalinos naquele local.

O aparelho utilizado foi uma Polisecc Mod 20, marca Presi, e as condições de polimento correspondentes a 40 volts, e tempo de ataque de 90 segundos.

### 3. ENSAIOS DE AREIAS E MOLDES

#### 3.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AREIAS

As duas areias utilizadas (90-100 e 45-50 AFS) foram submetidas a testes de distribuição granulométrica da seguinte maneira, seguindo norma da American Foundry Society:

Foram colocadas 50gramas da amostra de areia seca sobre a primeira peneira, de uma série de 10 peneiras normalizadas pela AFS (American Foundry Society) de números 20,30,40,50,70,100,140,200 e 270, correspondentes a aberturas entre malhas de 0,841 / 0,595 / 0,420 / 0,297 / 0,210 / 0,149 / 0,105 / 0,074 e 0,053 respectivamente.

As amostras eram então submetidas a vibração mediante um dispositivo agitador. durante 15 minutos, após os quais a areia sob cada peneira era pesada individualmente, determinando-se o número de finura de grão AFS, a distribuição acumulativa e a frequência do tamanho do grão.

Os resultados obtidos podem ser vistos no Capítulo 4.

### 3.2. CONFERÊNCIA DO TEOR DA ÁGUA ADICIONADO

Todas as misturas de areia foram feitas com água em porcentagem em peso da areia, de 2, 4 e 6%. Estes teores foram comprovados utilizando o método por carboneto de cálcio, mediante aparelho "Speedy" Tipo C, que utiliza a reação química entre a água e o carboneto de cálcio para formar gás acetileno.

O teste foi feito seguindo normas AFS.

O dispositivo utilizado é um recipiente fechado ao ar, provido de um medidor da pressão do gás produzido no interior e um manômetro exterior que dá leitura direta em % de umidade.

É pesada uma quantidade determinada de areia e colocada no interior do aparelho juntamente com o carboneto de cálcio. Após agitação para misturar a areia e o carboneto, pode-se observar no manômetro o valor da umidade.

Em todos os casos conferidos, a leitura observada coincide plenamente com os valores medidos por pesagem, na confecção das misturas, com erro de 1,0%.

### 3.3. MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS MOLDES

A resistência à tração de uma mistura de areia é a resistência máxima que a mistura é capaz de suportar quando é preparada, comprimida e ensaiada de acordo com as normas.

Foram feitos testes de resistência à tração para as duas areias, com seus respectivos teores de umidade e as diferentes temperaturas de congelamento.

O método utilizado foi o recomendado pela AFS, e foi feito da seguinte maneira:

Foram preparados corpos de prova normalizados, de 7,5 cm de comprimento por 2,3 cm de largura, com um colarinho de 2,5 cm no centro, conforme mostrado na figura 3.3.-

A areia preparada foi colocada no molde normalizado e, após socar 3 vezes com um peso (também normalizado), todo o conjunto foi colocado dentro do nitrogênio líquido, para congelamento à temperatura desejada. O termopar era posicionado a aproximadamente 10 mm de profundidade, na posição indicada na figura 3.1.b.-

Uma vez o corpo de prova alcançava a temperatura desejada, era retirado e imediatamente submetido a forças de tração num aparelho de marca "Harry W Dietert".

Este equipamento consiste de um peso pendular e um braço, que oscilam sobre um eixo numa base sólida. Um motor eleva o braço através de um arco, assim forçando o corpo de prova a levantar o peso do pêndulo. Desta maneira, a carga vai aumentando gradativamente, até a ruptura do corpo de prova, quando o peso volta à sua posição original. Assim, na medida do deslocamento total do pêndulo até a ruptura do material, é uma medida de resistência.

As medições só foram possíveis de serem feitas para a areia 90-100, uma vez que nos corpos de prova utilizando areia 45-50, a temperatura variava demasiadamente rápido, não se obtendo valores de resistência à tração confiáveis.

Para efeitos comparativos, foi testado um corpo de prova feito de areia 90-100 e resina furânica + catalizador, nas mesmas proporções da mistura preparada para a confecção do molde padrão, isto é, segundo indicações dos fornecedores.

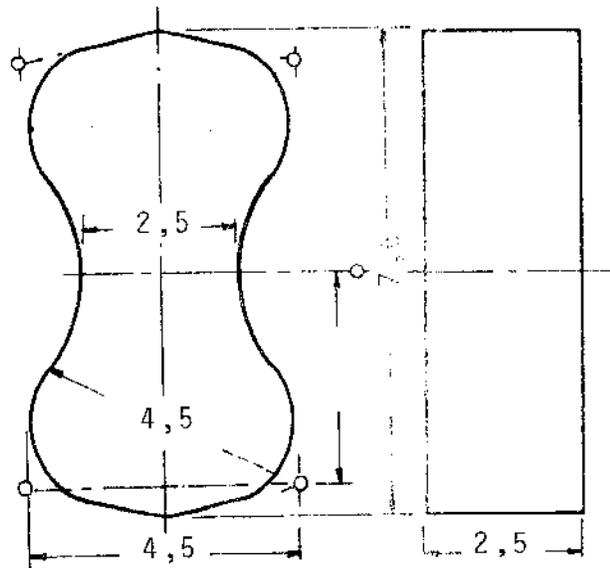


Fig. 3.3.- Corpo de prova utilizado nos ensaios de resistenciã a tração.

### 3.4. ENSAIO DE DUREZA SUPERFICIAL

A dureza superficial de um molde é a resistência que oferece a superfície deste à penetração de uma esfera padrão sob carga, aplicando a força com um ângulo de 90º da superfície.

O princípio do teste é similar ao utilizado pelo sistema Brinell, sendo que, quanto menor a dureza da superfície, maior será a penetração da esfera; superfícies que não oferecem resistência à esfera têm dureza zero, e as que resistem completamente (penetração 0), tem dureza 100.

O instrumento consiste num relógio graduado, cuja base é dotada de uma esfera de raio 2.54 mm. que quando pressionada sobre a superfície do molde, aciona uma mola que por sua vez determina a leitura do deslocamento sofrido, na escala graduada.

Não foi possível obter medidas confiáveis de dureza dos corpos de prova, uma vez que estes apresentaram um rápido aumento da temperatura, devido a sua forma e massa, o qual acontecia durante o tempo necessário para zerar o instrumento na superfície do corpo de prova, antes da medição, o que demorava aproximadamente 30 seg.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 1. ANÁLISE DA MATÉRIA PRIMA

#### 1.1. UMIDADE DAS AREIAS BASE

As areias base apresentaram um teor de umidade de 0.01% (areia 45-50) e 0.03% (areia 90-100) antes de serem misturadas com água para os diferentes ensaios. Como o valor mínimo de água adicionado foi de 2%, a umidade inicial das areias foi considerado desprezível.

#### 1.2. GRANULOMETRIA

A granulometria encontrada nas areias foi de 42,5 A.F.S. para a areia 45-50 e 85.4 para a areia 90-100. Nos anexos 1 e 2 é apresentado o método de cálculo do valor real do tamanho do grão da areia utilizada.

Estes valores encontrados no ensaio granulométrico estão abaixo dos valores especificados, porém, a distribuição granulométrica atende os objetivos das experiências: as duas areias possuem características granulométricas totalmente diferentes, como pode ser observado nas curvas das Figuras 4.1 e 4.2.

Conforme mostrado nas figuras, pode ser observado que a areia especificada comercialmente como 45-50 tem uma composição tal que 80% de seus grãos são maiores que 0,15mm. Por outra parte, a areia especificada como 90-100, possui aproximadamente 95% de seus grãos com dimensões menores que 0,15mm.

Desta maneira, as duas areias apresentam distribuições de tamanhos de grãos totalmente diferentes, atendendo os objetivos de utilização de areias de características diferentes.

### DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

AREIA 90-100

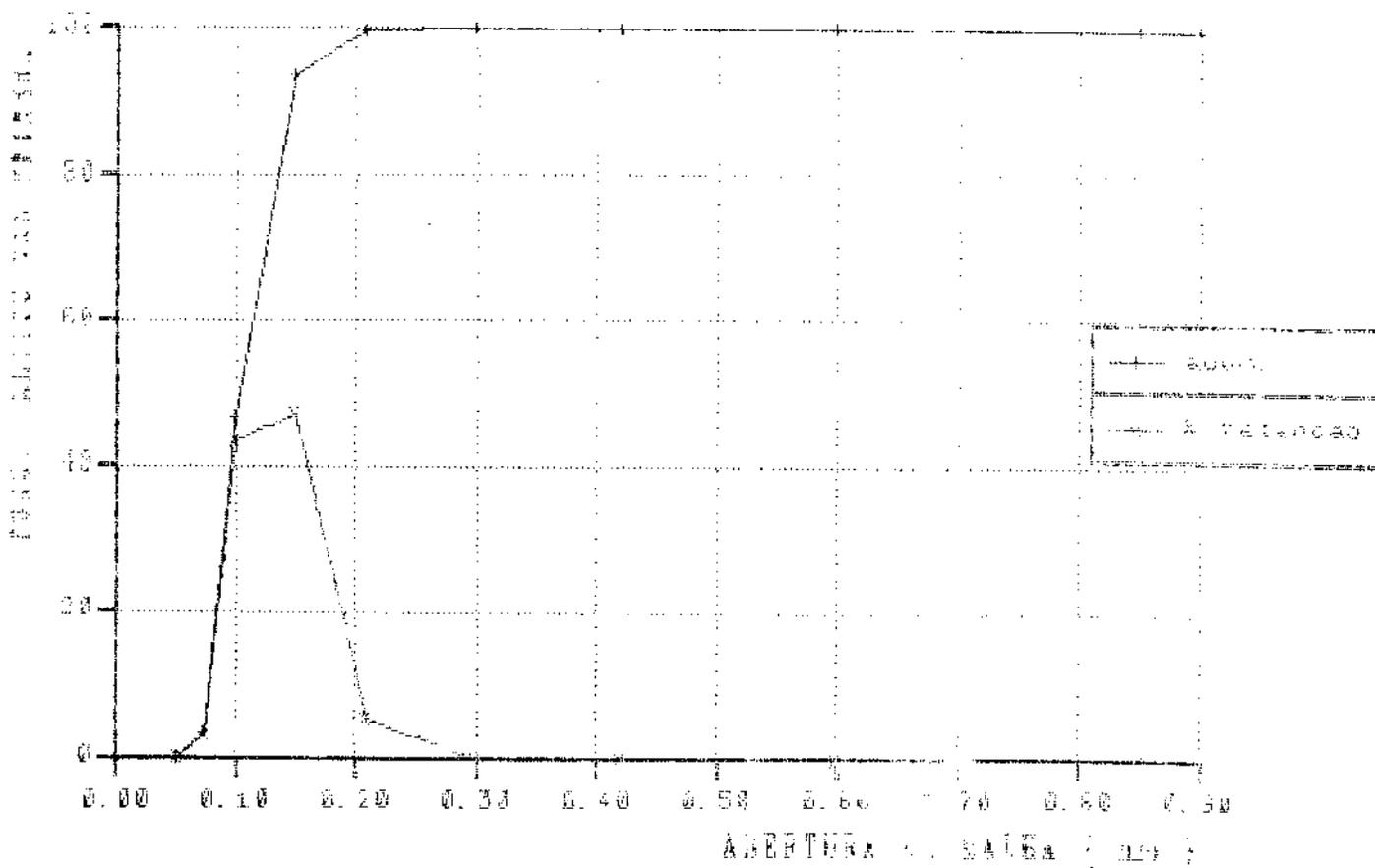


Fig. 4.1. Distribuição granulométrica da areia 90-100 utilizada

DISTRIBUICAO GRANULOMETRICA

AREIA 45-50

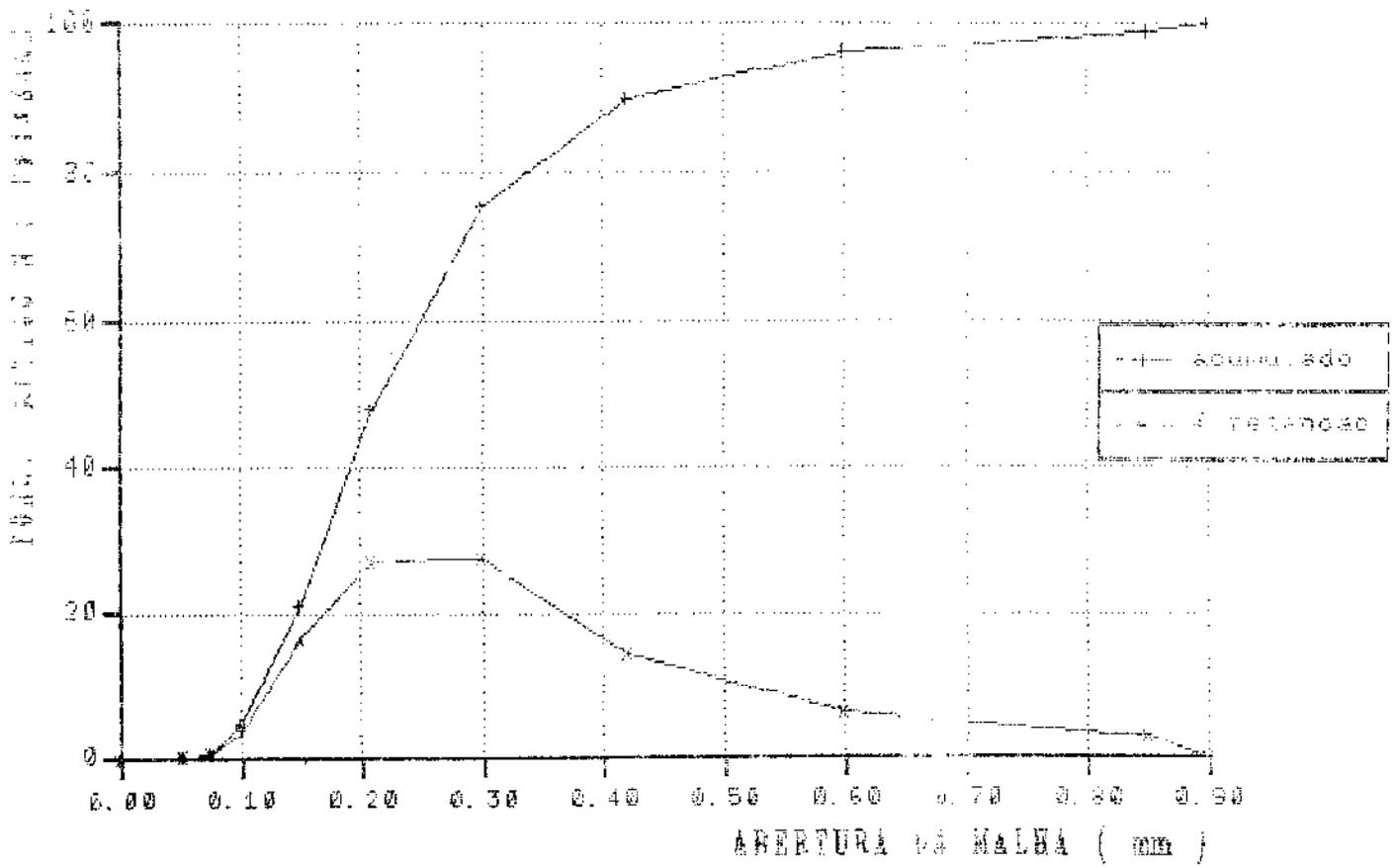


Fig 4.2. Distribuição granulométrica da areia 45-50 utilizada

Superpondo as curvas 4.1 e 4.2 pode ser observado nitidamente a diferença do tamanho de grão acumulado pelas duas areias. É interessante observar também, que no ensaio granulométrico da areia 90-100, a qual possui praticamente 100% de seus grãos menores que 0,30mm, a areia ficou retida nas 3 primeiras peneiras da série padronizada pela AFS. Já a areia 45-50 apresentou uma distribuição diferente, sendo que a areia ficou retida em todas as peneiras padronizadas.

Do ponto de vista prático, em fundição, a determinação de finura de grão de uma areia é um método rápido para estabelecer o tamanho de grão médio de uma areia, sendo muito útil para comparar areias de distribuições similares.

O fato de duas areias apresentarem o mesmo módulo de finura (número AFS) não significa no entanto, que sejam semelhantes: duas areias podem apresentar o mesmo tamanho médio de grão, traduzido pelo módulo de finura, mas distribuições granulométricas totalmente diferentes, e desta maneira, podem diferir totalmente nas suas propriedades, principalmente na permeabilidade ao ar e gases presentes ou gerados no molde ou metal fundido.

De acordo com estas observações, como a areia 45-50 utilizada possui uma distribuição de tamanhos de grãos mais ampla que a areia 90-100, é de se supor que o grau de compactação que pode ser alcançado com a areia 45-50 pode ser maior que o da areia 90-100, uma vez que seus grãos podem acomodar-se melhor, devido a esta maior amplitude de variação de tamanho dos grãos (os finos podem preencher espaços entre os grãos maiores).

Além das dimensões e distribuição dos grãos, foi também observada e caracterizada a sua forma. O resultado é mostrado na figura 4.3, onde se pode observar que os grãos de areia grossa são arre -



( a )



( b )



( c )



( d )

Fig. 4.3.- Fotografias das areias utilizadas, obtidas no microscopio eletrônico de varredura.

- Grãos de areia 45-50 ( a = 50 x, b = 100 x )
- Grãos de areia 90-100 ( c = 50 x, d = 100 x )

ondados, enquanto os da areia 90-100 são mais angulares. Desta forma a areia 90-100 pode ter sua compactação aumentada, em relação à 45-50, embora com menor amplitude de distribuição de grãos.

## 2. VIABILIDADE DE CONFECÇÃO E UTILIZAÇÃO DOS MOLDES

A possibilidade de obtenção de formas estáveis e rígidas moldadas com areias contendo pequenos teores de água, e submetidas a temperaturas sub-zero foi verificada.

O processo se revelou bastante simples e de fácil utilização. Os mecanismos pelos quais a presença da água congelada entre grãos de areia promove a sua coesão e fornece alta rigidez aos moldes assim obtidos, podem ser discutidos; é de se supor que ao se adicionar água à areia seca, uma parte do espaço vazio entre os grãos de areia é ocupada e que uma pequena porção desta água é absorvida pela superfície dos grãos.

Ao ser congelada, a água se expande, ocupando um maior volume dos espaços entre grãos, aumentando sua coesão; além disto e, é de se supor que este seja o fator mais importante à promoção da coesão, a água absorvida superficialmente, deve formar uma rede cristalina contínua, envolvendo os grãos de areia.

Estes fenômenos podem ser responsáveis pela "aglomeração" da areia, possibilitando a obtenção de moldes. Não deve ser esquecido, no entanto, que também pode estar presente e ser mesmo de fundamental importância, a formação de dipolos entre grãos de areia e camadas de água adjacentes a eles, conforme explicado no Capítulo 1. Estes dipolos seriam estabilizados pelo congelamento da água e também contribuiriam assim para a manutenção de coesão entre os grãos de areia.

Após verificada a possibilidade de obtenção de moldes congelados, passou-se ao estudo dos parâmetros que influem no processo.

## 2.1. TEMPO DE CONGELAMENTO

Foi medido o tempo de congelamento de moldes até a temperatura de  $-193^{\circ}\text{C}$ ; os valores obtidos foram pequenos : cerca de 7 minutos, desde o momento da imersão do molde no Nitrogênio líquido até ser atingida e estabilizada a temperatura no seu interior (posição do termopar indicada na Figura 3.1.b) em torno da temperatura do Nitrogênio líquido ( $-193^{\circ}\text{C}$ ).

A Figura 4.4 mostra a variação da temperatura do molde com o tempo de imersão em Nitrogênio líquido para um molde confeccionado com areia 90-100 contendo 2% de água em sua composição. Esta curva é igualmente representativa para moldes confeccionados em outras condições, uma vez que o tempo de congelamento mostrou-se independente destas condições: não parece influenciado pelo grau de umidade das areias, nem sua granulometria.

Nos diversos casos analisados, o tempo total de congelamento resultou em valores de ordem de 7 min.

Pode-se pensar no fato como resultado do violento regime de refrigeração imposto ao sistema areia - água : o diferencial térmico seria suficientemente elevado (entre a temperatura ambiente da lingoteira, cerca de  $25^{\circ}\text{C}$ , e a do Nitrogênio líquido), para provocar trocas de calor rápida e independentemente de alterações nas propriedades térmicas do molde provocadas pela presença de diferentes, mas provavelmente não significantes, para o aspecto analisado, variações no teor de água e na distribuição granulométrica das areias.

Cabe aqui lembrar, no entanto, que diferentes geometrias de moldes podem produzir diferentes resultados, por exemplo: em paredes de moldes com espessura mais robusta, a troca de calor pode ser mais sensível à granulometria e distribuição granulométrica da areia. Os resultados aqui apresentados são, portanto, restritos à geometria analisada.

### TEMPO DE CONGELAMENTO DOS MOLDES

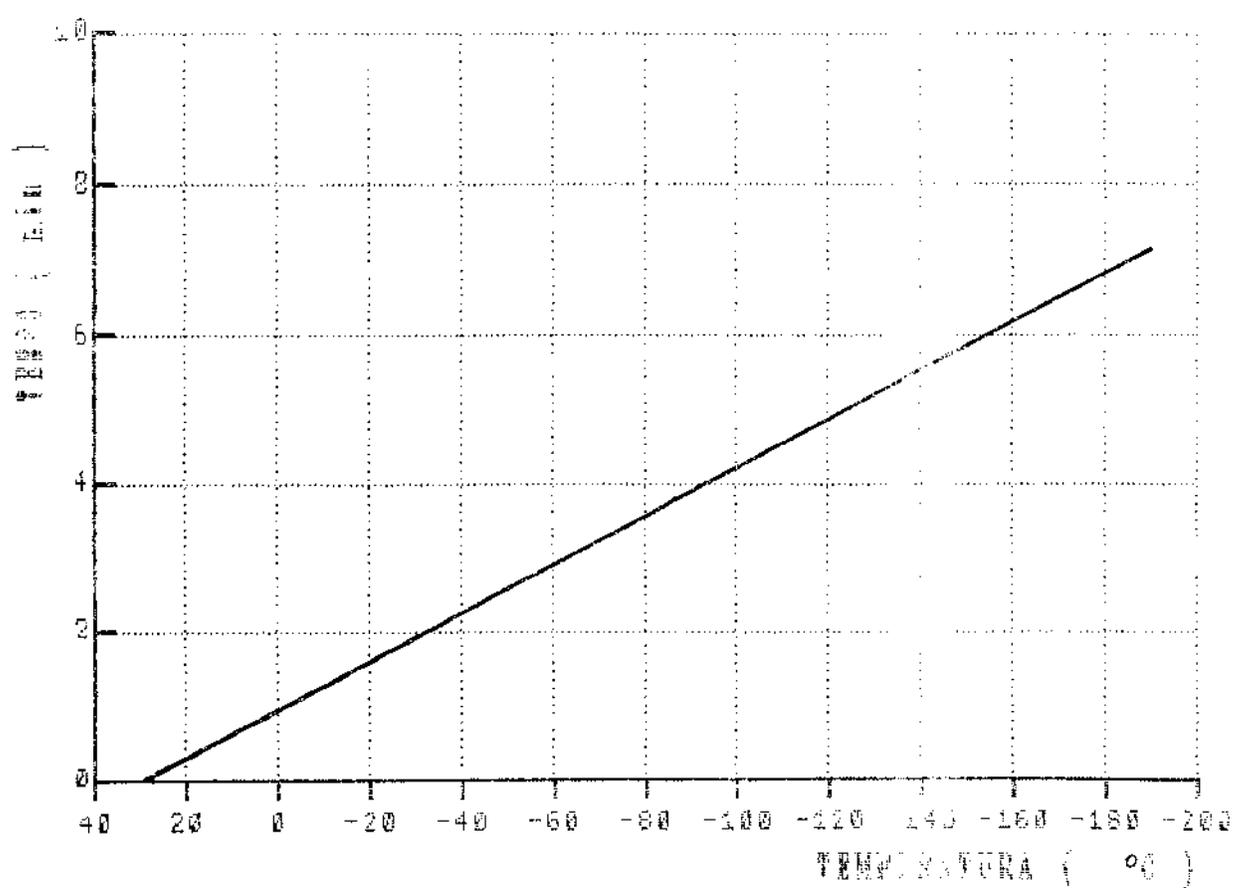


Fig. 4.4 Tempo de congelamento de molde de areia 90-100 com 2 % de umidade, representativo para as duas areias e as três umidades.

A utilização prática destes moldes, no entanto, como será observado em capítulos posteriores, não requer necessariamente o seu congelamento a  $-193^{\circ}\text{C}$ ; assim, tempos menores, mesmo de ordem de 2 minutos, podem ser suficientes para obtenção das condições de rigidez do molde e de segurança desejadas ao vazamento do metal líquido.

## 2.2. DESCONGELAMENTO DOS MOLDES AO AR

Os tempos totais de descongelamento ao ar (temperatura ambiente de  $33^{\circ}\text{C}$ ), nas diferentes condições de granulometria e umidade da areia são mostradas na Tabela 4.1, enquanto as curvas de Variação da Temperatura com o Tempo são mostradas na Figura 4.5 e 4.6, respectivamente para a areia 90-100 e 45-50.

Em todos os casos, os moldes foram retirados do Nitrogênio líquido à temperatura de  $-110^{\circ}\text{C}$ , sendo medido o tempo de aquecimento até ser atingido  $0^{\circ}\text{C}$ .

Observou-se em todos os casos um tempo de descongelamento variando de 26 a 33 minutos. Após este tempo, os moldes apresentaram perda da resistência mecânica, e umidade; não apresentaram, no entanto, esboroamento espontâneo.

Pela comparação das Figuras 4.5 e 4.6 pode-se notar que as curvas de aquecimento para as diferentes condições de confecção de moldes utilizadas são semelhantes: o tempo de descongelamento não parece depender da granulometria / distribuição granulométrica da areia utilizada, para todas as umidades analisadas.

Para uma mesma umidade, o tempo total de descongelamento do molde pode ser considerado praticamente não variante com o tipo de areia utilizada, tendo em vista os altos tempos obtidos e a pequena faixa de variação destes tempos ( 26 a 32 min. )

		t desc. ( min )	
		45 - 50	90 - 100
H %	are.		
	2	27	26
	4	31	32
6	33	32	

Tabela 4.1.- Tempos totais de descongelamento ao ar para as diversas condições analisadas. ( T início = -110 °C, T final = 0 °C )

Fig. 4.5. Descongelamento dos moldes de areia 90-100 ao ar

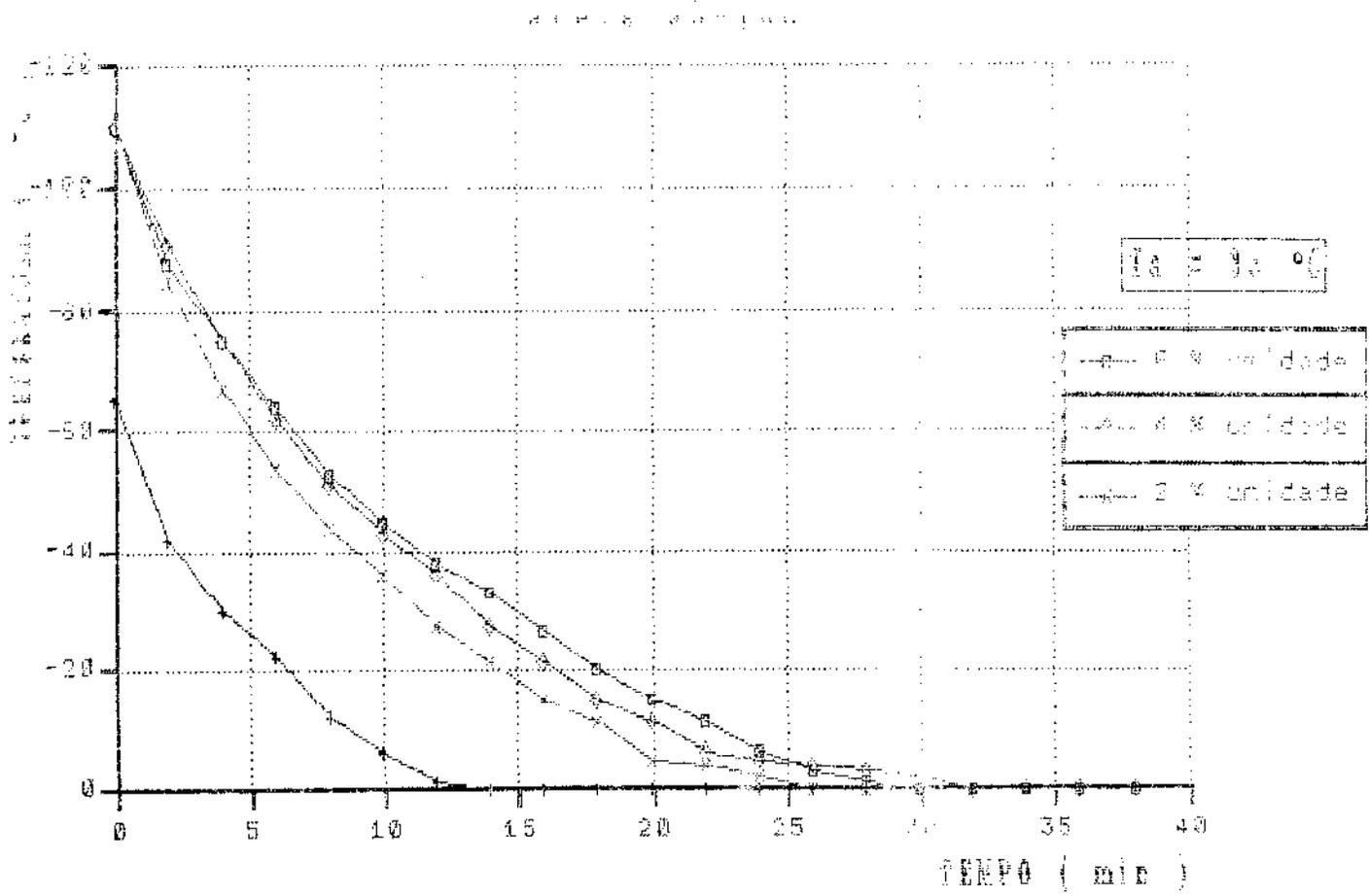


Fig. 4.5. Descongelamento dos moldes de areia 90-100 ao ar

### DESCONGELAMENTO DOS MOLDES AO AR

areia 45-50

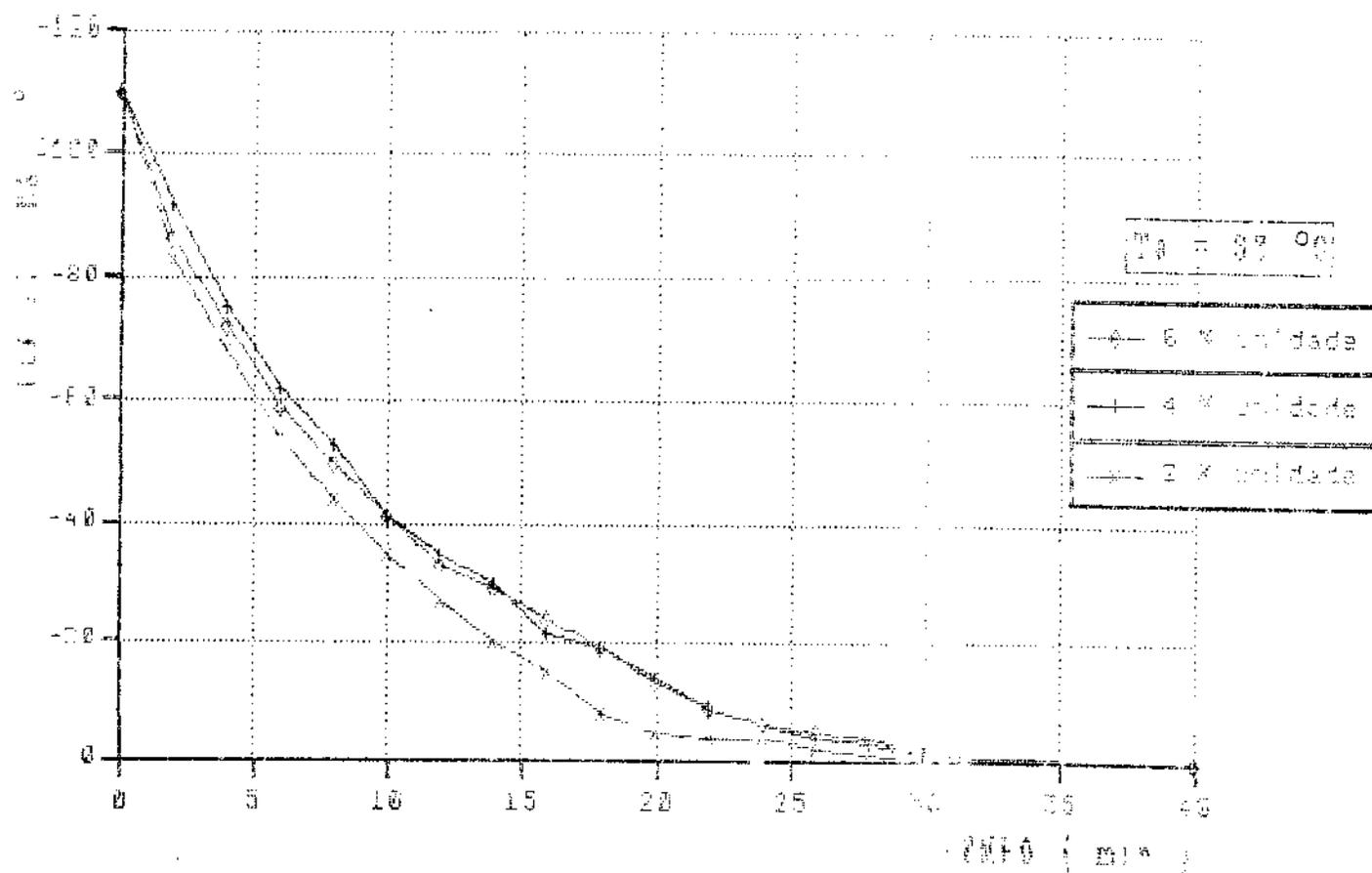


Fig. 4.6. Descongelamento dos moldes de areia 45-50 ao ar

Nota-se também que para ambas as areias, a variação do teor de água de 5 para 6% pouco interfere nas curvas de aquecimento do molde, enquanto uma pequena redução no tempo de descongelamento é observado para o menor teor de água.

Assim, pode-se dizer que a variação de Temperatura do molde com o Tempo de descongelamento, não depende da granulometria da areia, mas somente do teor de água utilizado, sendo maior o tempo para o maior teor.

A não dependência do tempo de descongelamento em relação ao tipo de areia parece mais uma vez confirmar o fato, observado quando da análise das curvas de congelamento, de que as possíveis alterações na condutividade térmica de areias devido a diferentes distribuições granulométricas não interfere sensivelmente na cinética de congelamento e descongelamento de moldes submetidos a baixas temperaturas. Poder-se-ia pensar o fato como sendo consequência dos altos gradientes térmicos envolvidos.

Quanto à influência do teor de água, no caso do descongelamento, o aumento do volume de gelo presente (para uma mesma quantidade e tipo de areia), pode provocar o aumento do tempo de descongelamento, uma vez que o ar que circunda o molde pode ser mais severamente resfriado, retardando a cessão de calor ao sistema.

Foi verificado, além disso, o tempo de descongelamento do molde confeccionado com areia 90-100 e contendo 2% de água, a partir de  $-65^{\circ}\text{C}$ . A curva de descongelamento obtida é mostrada também na Figura 4.6 : tal curva se apresenta paralela à obtida para molde nas mesmas condições, descongelado a partir de  $-110^{\circ}\text{C}$ . Pode-se deduzir, portanto, que os fenômenos envolvidos na troca térmica obedecem às mesmas leis dos casos anteriores.

Tal resultado permite a avaliação prévia do tempo de descongelamento de moldes submetidos a diferentes temperaturas, desde que mantidas as condições de descongelamento.

Comparando as curvas 4.5 e 4.6, onde são dados os tempos de Descongelamento das duas areias, para os diferentes teores de umidade, com a curva de Congelamento, Figura 4.4, pode-se observar que o tempo total de descongelamento, para qualquer caso, é sensivelmente maior que o tempo de congelamento, dada a diferença de velocidade de retirada de calor no sistema gelo-ar em relação ao nitrogênio-água.

Este fato pode ainda explicar a linearidade da variação da Temperatura com o Tempo, no congelamento, comportamento este que não é mantido no descongelamento; neste caso, há resfriamento de uma camada de ar próxima à parede do molde, dificultando a transferência de calor e alterando o regime de trocas; resultando nas curvas observadas.

## 2.1. TEMPO DE RESFRIAMENTO.

Foi medido o tempo de resfriamento de moldes até a temperatura de  $-193^{\circ}\text{C}$ ; os valores obtidos foram pequenos : cerca de 7 minutos, desde o momento da imersão do molde no Nitrogênio líquido até ser atingida e estabilizada a temperatura no seu interior (posição do termopar indicada na Figura 3.1.b) em torno da temperatura do Nitrogênio líquido ( $-193^{\circ}\text{C}$ ).

A Figura 4.4 mostra a variação da temperatura do molde com o tempo de imersão em Nitrogênio líquido para um molde confeccionado com areia 90-100 con - tendo 2% de água em sua composição. Esta curva é igualmente representativa para moldes confeccionados em outras condições, uma vez que o tempo de congelamento mostrou-se independente destas condições: não parece influenciado pelo grau de umidade das areias, nem sua granulometria.

Nos diversos casos analisados, o tempo total de congelamento resultou em valores de ordem de 7 min.

Pode-se pensar no fato como resultado do violento regime de refrigeração imposto ao sistema areia - água : o diferencial térmico seria suficientemente elevado (entre a temperatura ambiente da lingoteira, cerca de  $25^{\circ}\text{C}$ , e a do Nitrogênio líquido), para provocar trocas de calor rápida e independentemente de alterações nas propriedades térmicas do molde provocadas pela presença de diferentes, mas provavelmente não significantes, para o aspecto analisado, variações no teor de água e na distribuição granulométrica das areias.

Cabe aqui lembrar, no entanto, que diferentes geometrias de moldes podem produzir diferentes resultados, por exemplo: em paredes de moldes com espessura mais robusta, a troca de calor pode ser mais sensível à granulometria e distribuição granulométrica da areia. Os resultados aqui apresentados são, portanto, restritos à geometria analisada.

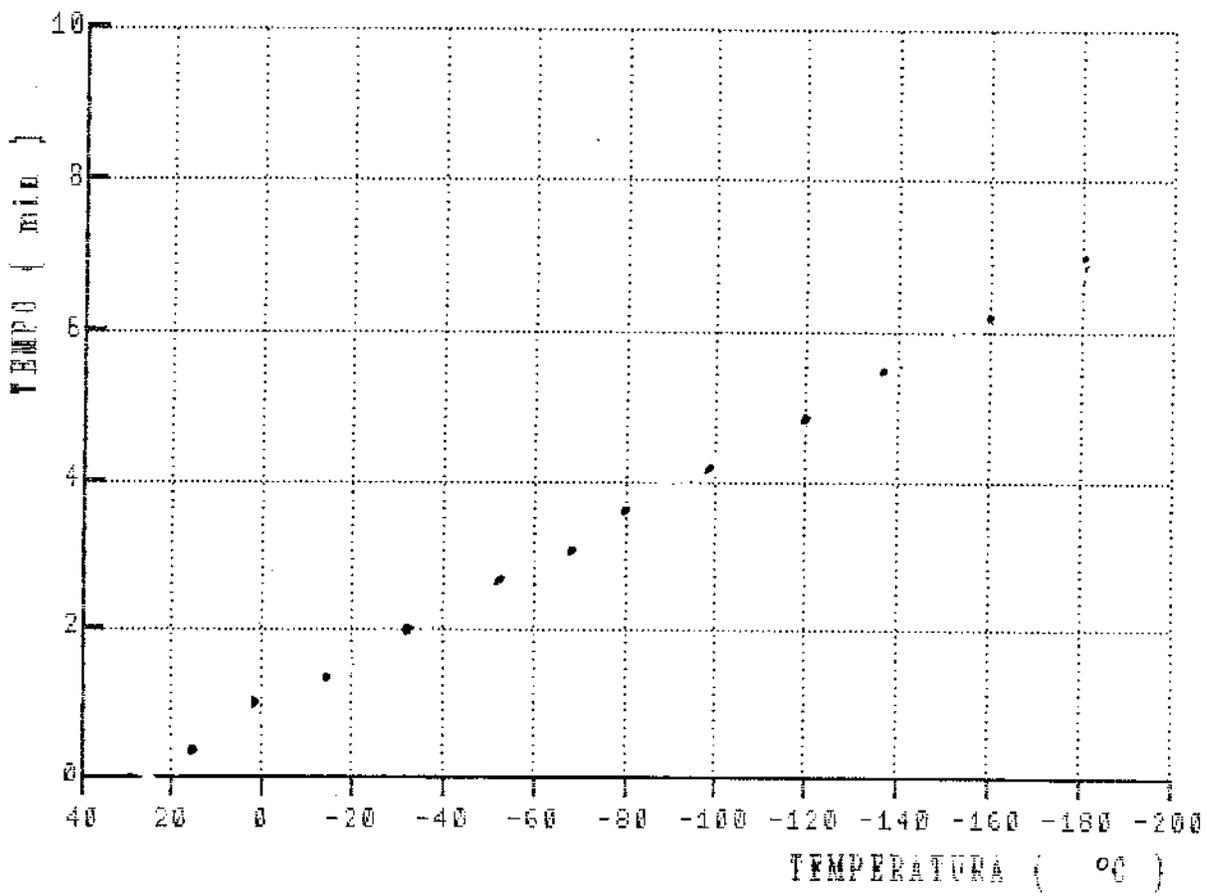


Fig. 4.4 Tempo de resfriamento de molde de areia 90-100 com 2 % de umidade, representativo para as duas areias e as três umidades.

A utilização prática destes moldes, no entanto, como será observado em capítulos posteriores, não requer necessariamente o seu congelamento a  $-193^{\circ}\text{C}$ ; assim, tempos menores, mesmo de ordem de 2 minutos, podem ser suficientes para obtenção das condições de rigidez do molde e de segurança desejadas ao vazamento do metal líquido.

## 2.2. AQUECIMENTO DOS MOLDES AO AR

Os tempos totais de aquecimento ao ar (temperatura ambiente de  $33^{\circ}\text{C}$ ), nas diferentes condições de granulometria e umidade da areia são mostradas na Tabela 4.1, enquanto as curvas de Variação da Temperatura com o Tempo são mostradas na Figura 4.5 e 4.6, respectivamente para a areia 90-100 e 45-50.

Em todos os casos, os moldes foram retirados do Nitrogênio líquido à temperatura de  $-110^{\circ}\text{C}$ , sendo medido o tempo de aquecimento até ser atingido  $0^{\circ}\text{C}$ .

Observou-se em todos os casos um tempo de descongelamento variando de 26 a 33 minutos. Após este tempo, os moldes apresentaram perda da resistência mecânica, e umidade; não apresentaram, no entanto, esboroamento espontâneo.

Pela comparação das Figuras 4.5 e 4.6 pode-se notar que as curvas de aquecimento para as diferentes condições de confecção de moldes utilizadas são semelhantes: o tempo de descongelamento não parece depender da granulometria / distribuição granulométrica da areia utilizada, para todas as umidades analisadas.

Para uma mesma umidade, o tempo total de aquecimento do molde pode ser considerado praticamente não variante com o tipo de areia utilizada, tendo em vista os altos tempos obtidos e a pequena faixa de variação destes tempos ( 26 a 32 min. )

		t. desc. ( min )	
are. H %	45 - 50	90 - 100	
2	27	26	
4	31	32	
6	33	32	

Tabela 4.1.- Tempos totais de aquecimento ao ar para as diversas condições analisadas. ( T início = -110 °C, T final = 0 °C )

areia 90-100

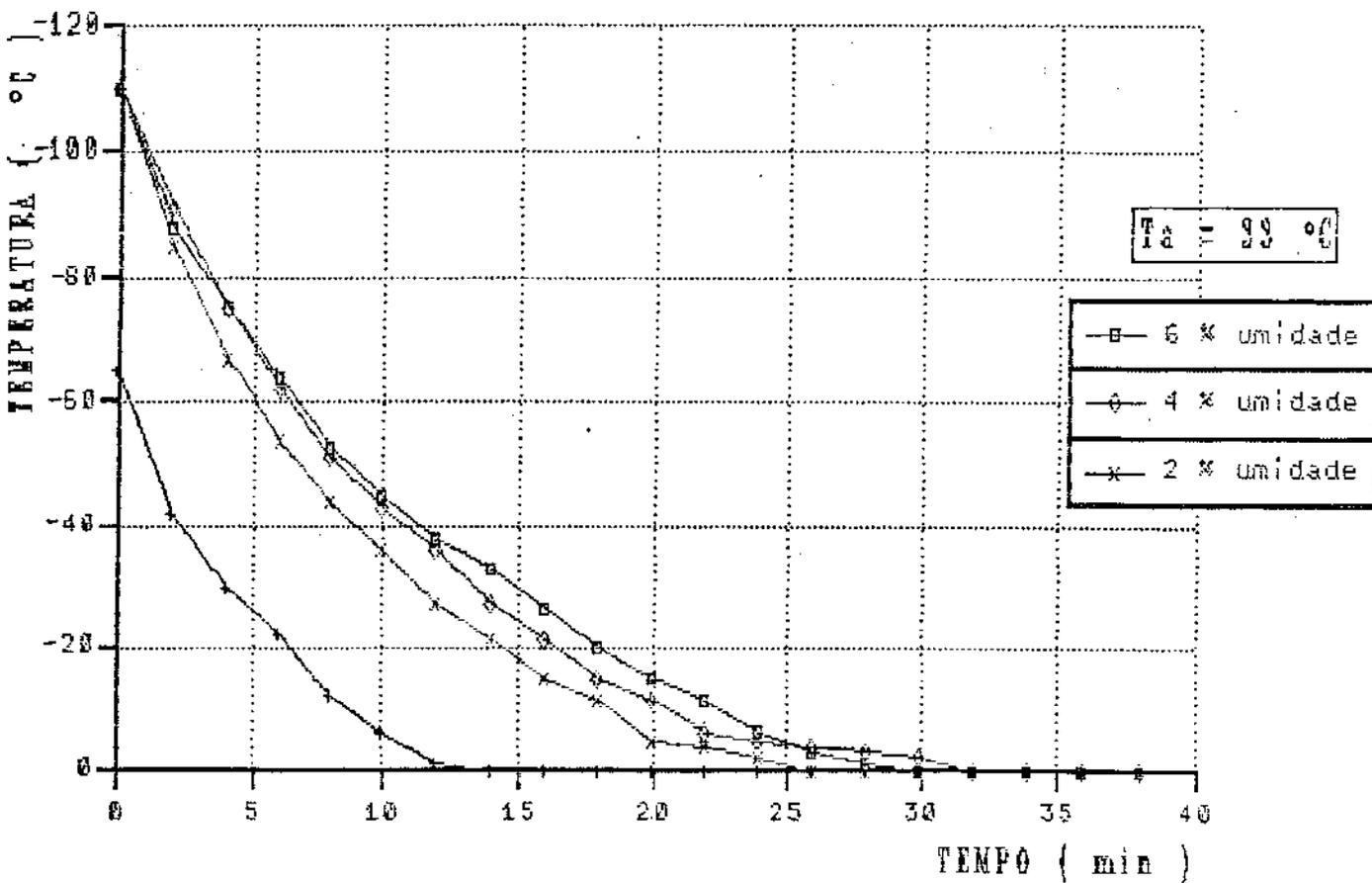


Fig. 4.5. Aquecimento dos moldes de areia 90-100 ao ar

areia 45-50

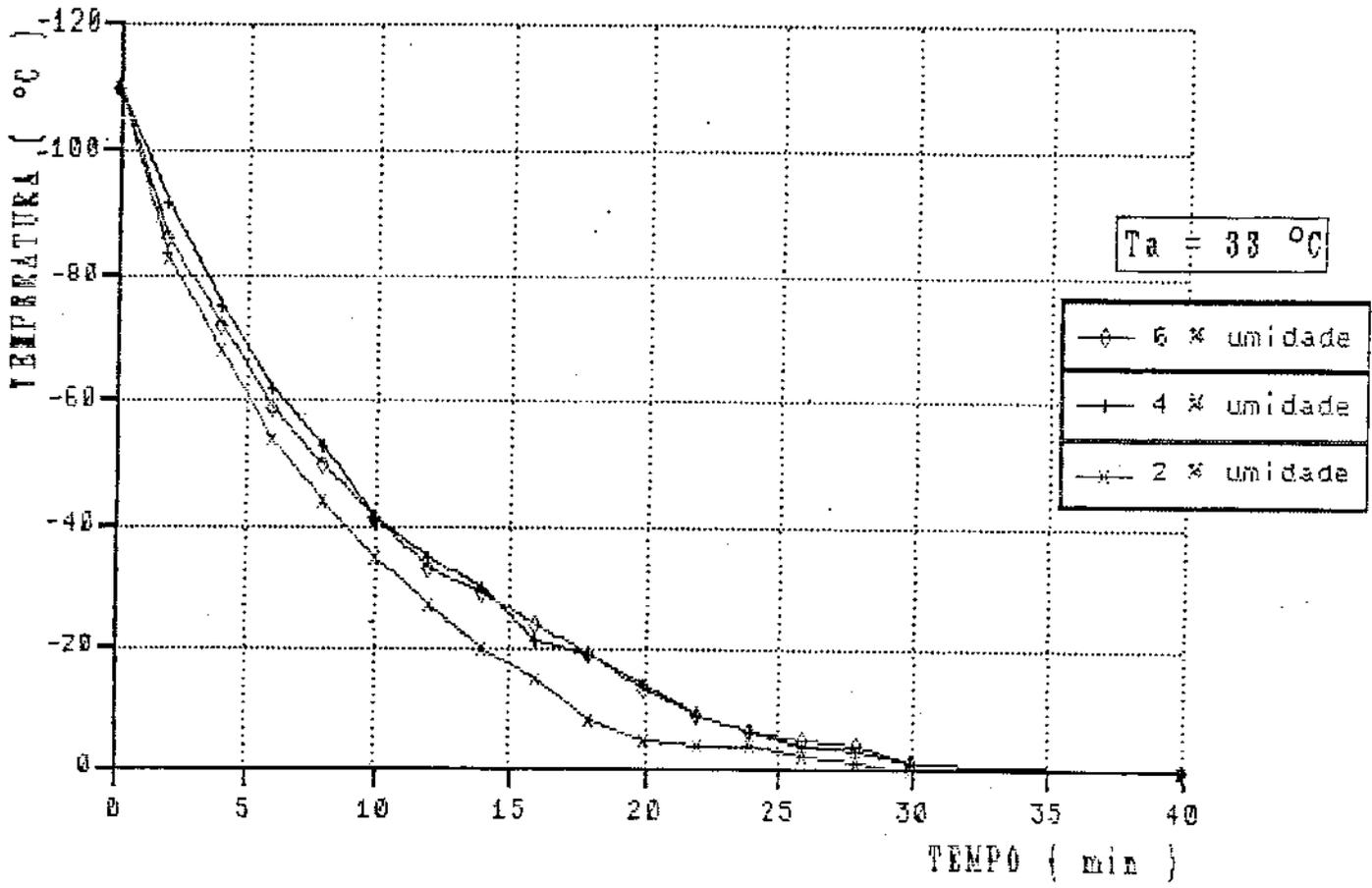


Fig. 4.6. Aquecimento dos moldes de areia 45-50 ao ar

Nota-se também que para ambas as areias, a variação do teor de água de 4 para 6% pouco interfere nas curvas de aquecimento do molde, enquanto uma pequena redução no tempo de descongelamento é observado para o menor teor de água.

Assim, pode-se dizer que a variação de Temperatura do molde com o Tempo de aquecimento, não depende da granulometria da areia, mas somente do teor de água utilizado, sendo maior o tempo para o maior teor.

A não dependência do tempo de descongelamento em relação ao tipo de areia parece mais uma vez confirmar o fato, observado quando da análise das curvas de congelamento, de que as possíveis alterações na condutividade térmica de areias devido a diferentes distribuições granulométricas não interfere sensivelmente na cinética de congelamento e descongelamento de moldes submetidos a baixas temperaturas. Poder-se-ia pensar o fato como sendo consequência dos altos gradientes térmicos envolvidos.

Quanto à influência do teor de água, no caso do descongelamento, o aumento do volume de gelo presente (para uma mesma quantidade e tipo de areia), pode provocar o aumento do tempo de descongelamento, uma vez que o ar que circunda o molde pode ser mais severamente resfriado, retardando a cessão de calor ao sistema.

Foi verificado, além disso, o tempo de Aquecimento do molde confeccionado com areia 90-100 e contendo 2% de água, a partir de  $-65^{\circ}\text{C}$ . A curva de descongelamento obtida é mostrada também na Figura 4.6 : tal curva se apresenta paralela à obtida para molde nas mesmas condições, descongelado a partir de  $-110^{\circ}\text{C}$ . Pode-se deduzir, portanto, que os fenômenos envolvidos na troca térmica obedecem às mesmas leis dos casos anteriores.

Tal resultado permite a avaliação prévia do tempo de descongelamento de moldes submetidos a diferentes temperaturas, desde que mantidas as condições de descongelamento.

Comparando as curvas 4.5 e 4.6, onde são dados os tempos de Aquecimento das duas areias, para os diferentes teores de umidade, com a curva de Congelamento, Figura 4.4, pode-se observar que o tempo total de Aquecimento, para qualquer caso, é sensivelmente maior que o tempo de congelamento, dada a diferença de velocidade de retirada de calor no sistema gelo-ar em relação ao nitrogênio-água.

Este fato pode ainda explicar a linearidade da variação da Temperatura com o Tempo, no congelamento, comportamento este que não é mantido no descongelamento; neste caso, há resfriamento de uma camada de ar próxima à parede do molde, dificultando a transferência de calor e alterando o regime de trocas; resultando nas curvas observadas.

## 2.3. PROPRIEDADES DOS MOLDES

### 2.3.1. LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os valores dos limites de resistência à tração obtidos são representados na tabela 4.2, em função dos vários parâmetros analisados. A Figura 4.7 mostra graficamente a variação da resistência à tração de moldes de areia 90-100, em função das diferentes temperaturas de congelamento e teores de água adicionados.

Conforme os valores observados, a resistência à tração é função direta do teor de água na mistura, sendo que a maior resistência é obtida com o teor de 6%.

Observações semelhantes já haviam sido feitas por K.Kita e colaboradores (29) em trabalho anterior. Os autores observaram que, em ensaios de corpos de prova de areia congelada, para uma maior umidade da mistura era obtida uma maior resistência.

Os ensaios de Kita não foram feitos de acordo com norma A.F.S. utilizada para areias convencionais; o autor procedeu ao socamento dos corpos de prova no interior do meio refrigerante, analisando a influência do grau de socamento.

No presente trabalho o procedimento adotado nos ensaios de tração dos moldes congelados foi o normalizado pela A.F.S. para areias convencionais para se obter resultados possíveis de comparação.

Pode-se explicar o aumento da resistência do molde congelado com o aumento do teor de água, pelo aumento do volume de gelo presente nos espaços entre os grãos de areia, o qual estaria formando fortes redes cristalinas e fortes ligações iônicas

mais estáveis entre os grãos de areia e esta camada rígida de gelo cristalizado. Tais forças dariam alta coesão e seriam responsáveis pela alta resistência à tração observadas nos moldes

Pode-se ainda observar da Figura 4.7 que a resistência à tração para o molde de areia 90-100 praticamente independe da temperatura de congelamento, para quaisquer dos teores de água adicionados.

TESTE DE RESISTENCIA A TRACAO  
AREIA 90-100

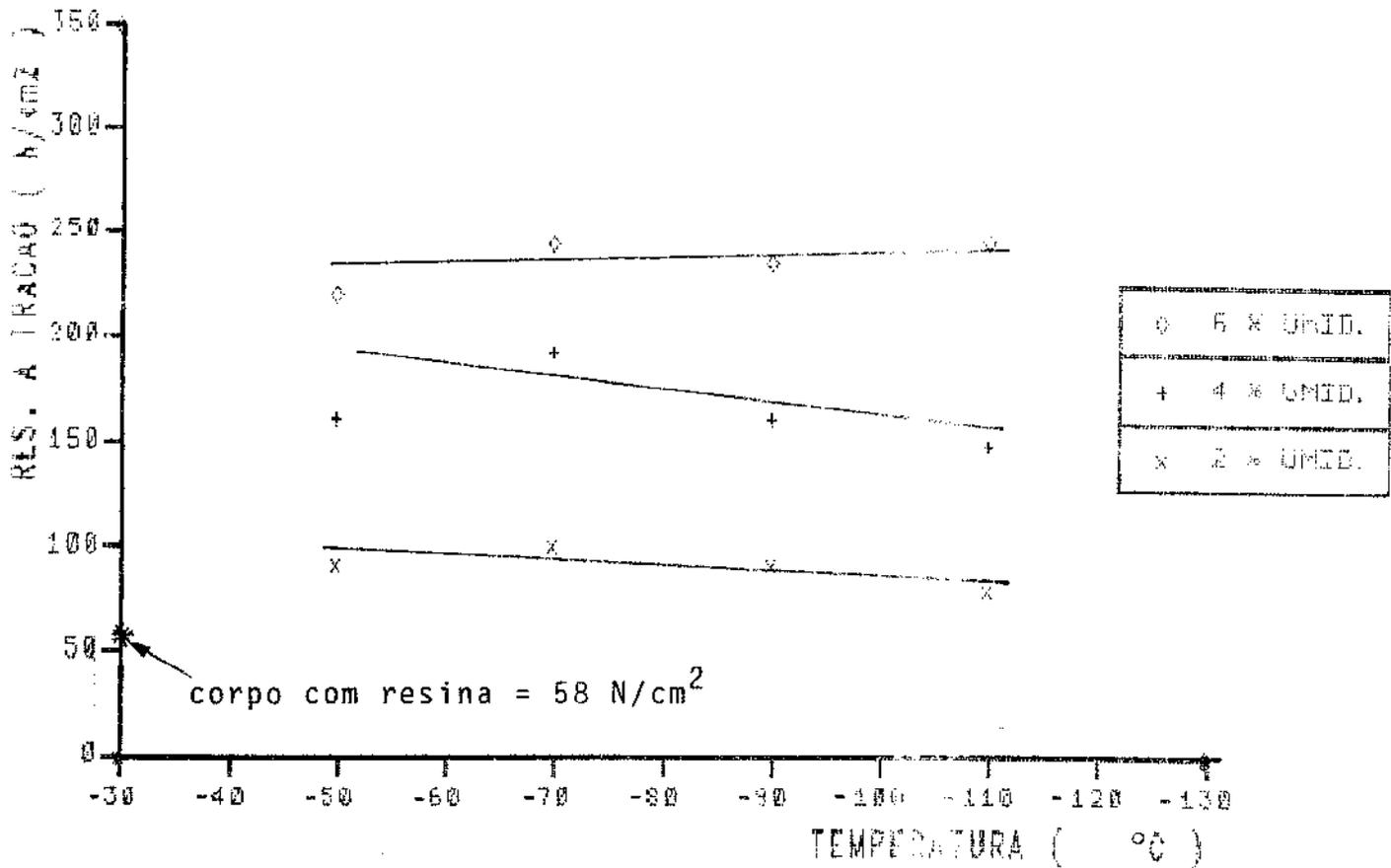


Fig. 4.7. Variação do limite de resistência a tração, para a areia 90-100, nas diferentes condições analisadas.

Isto indica que, uma vez congelada a água contida na mistura, está concluída a aglomeração dos grãos de areia, independentemente da temperatura em que o molde se encontre, desde que seja inferior à de congelamento da água.

Poder-se-ia portanto, obter moldes com grande rigidez, mesmo para congelamento a  $-10^{\circ}\text{C}$ , por exemplo; sua utilização seria dificultada, no entanto, pelo reduzido tempo de descongelamento ao ar. Este inconveniente, no entanto, não deve ser de difícil solução e pode ficar aqui como sugestão para posteriores estudos sobre o assunto.

Os valores de resistência à tração obtidos para os moldes congelados podem ser avaliados quando comparados com os obtidos no mesmo ensaio, para molde confeccionado com resina furânica, de acordo com instruções do fornecedor. O valor obtido neste caso e indicado numericamente na Figura 4.7, mostrou-se 55, 160 e 300% menor que os obtidos em moldes congelados com, respectivamente, 2, 4 e 6% de água na mistura.

Na Tabela 4.3 são dados os valores médios de resistência à tração de alguns dos processos mais comumente utilizados na indústria de fundição, dentro dos quais o processo de  $\text{CO}_2$  e o de moldes estufados.

Todos os processos, comparativamente, apresentam valores de resistência à tração inferiores aos obtidos com o processo de congelamento de moldes, embora estes valores sejam dependentes da umidade da mistura.

TIPO DE PROCESSO	RESISTÊNCIA (N/cm <sup>2</sup> )	OBSERVAÇÕES
MOLDES ESTUFADOS	100 - 210	Secagem a 150-300°C
CHAMOTE (COMPO)	140 - 175	Secagem a 500°C
AREIA - CIMENTO	21	Após 65hrs.
PROCESSO CO <sub>2</sub>	140 - 200	Após tratamento
CEREAL 1%	120	Umidade 4% Secagem 1h - 200°C
CEREAL 1% + 0.2% RESINA	190	Umidade 4% Secagem 1h - 200°C
RESINA FURANICA	58	1h de cura
MOLDE CONGELADO	85	2% de umidade
MOLDE CONGELADO	150	4% de umidade
MOLDE CONGELADO	240	6% de umidade

Tabela 4.3 - COMPARAÇÃO DO LIMITE DE RESISTÊNCIA OBTIDO EM DIVERSOS PROCESSOS (ENSAIADOS SEGUNDO NORMA AFS)

Deve ser lembrado ainda aqui que o método de compactação utilizado para a confecção dos corpos de prova para ensaios segundo a norma utilizada, não é suficiente para a promoção de um apropriado grau de compactação para areias contendo apenas água em sua composição.

Assim, os valores de resistência à tração obtidos para os corpos de prova congelados são, na verdade, provavelmente bem inferiores aos valores da resistência à tração dos próprios moldes, confeccionados com um grau de compactação bem maior que o dos corpos de prova para testes.

Os valores apresentados na Tabela 4.2 para resistência à tração de moldes congelados, devem, portanto, apresentar uma discrepância ainda maior com relação aos valores de resistência à tração dos outros tipos de moldes.

O grau de compactação inadequado para os moldes congelados, obtido pelo método padrão de obtenção de corpos de prova para ensaio de tração, pode ainda ser o fator responsável pela impossibilidade de se fazer este ensaio em moldes de areia 45-50 congelada.

Nestes casos, os corpos de prova apresentaram uma alta velocidade de descongelamento, não permitindo a obtenção de valores de resistência à tração confiáveis.

Esta maior velocidade de descongelamento ao ar provavelmente é consequência do socamento insuficiente, o que provoca uma baixa compactação (principalmente lembrando que o efeito foi mais acentuado para a areia de maior tamanho de grão), e por sua vez, uma

LIMITE DE RESIST. A TRAÇÃO N/cm<sup>2</sup>

		AREIA 45-50			AREIA 90 - 100		
H%		2	4	6	2	4	6
T °C							
- 50		Não obtido			91	161	219
- 70		Não obtido			100	193	244
- 90		Não obtido			91	161	235
- 110		Não Obtido			79	149	246

Tabela 4.2.- Valores de resistencia à tração de moldes congelados em diferentes condições.

permeabilidade ao ar maior, permitindo um descongelamento mais rápido. Frente a este inconveniente, seria necessário uma compactação maior que a dada pelo sistema de 3 socamentos, padronizado pela A.F.S.

Provavelmente adequados graus de compactação forneceriam valores de resistência à tração superiores aos obtidos, embora estes já sejam da ordem ou superiores aos atingidos com moldes convencionais.

Depreende-se também destas discussões que o grau de compactação é extremamente importante, no caso dos moldes congelados, não só para suas propriedades mecânicas, como também para o seu tempo de descongelamento.

#### 2.3.2. DUREZA E PERMEABILIDADE

A dureza dos corpos de prova de areia congelada não foi possível de ser obtida, conforme observado anteriormente, no Capítulo 3, devido principalmente ao tempo necessário para graduar o pelôgio do instrumento medidor de dureza; no sistema convencional padronizado pela A.F.S., tempo este suficiente para ocorrência de início de descongelamento do corpo de prova padrão.

Desta maneira, conforme as características especiais dos moldes congelados, quanto à necessidade de medir a dureza dentro de um tempo no qual não seja iniciado o processo de descongelamento (para não ter variações da dureza, consequência da variação da temperatura), seria necessário a utilização de um sistema no qual este tempo de medição fosse reduzido a um valor de acordo com a velocidade de descongelamento do corpo de prova para isto utilizado (5 a 10 segundos, no máximo), ou, a utilização de um sistema

no qual os corpos de prova manteriam a temperatura constante durante a medição por exemplo, sendo feita a medição dentro de um aparelho fechado e que permita as medições e leituras.

Este mesmo método poderia ser utilizado para medições de permeabilidade das areias, uma vez que o tempo de teste é suficientemente alto para que a areia tenha sua temperatura aumentada num valor que não permite obter resultados confiáveis com respeito a passagem do gas utilizado para a medida de permeabilidade.

Os testes de dureza e permeabilidade padronizados para a medida destas características de areias de fundição não são portanto, adequados para a medida destas mesmas características em moldes congelados.

Na impossibilidade de utilizar os instrumentos de medida disponíveis, a temperaturassub-zero, não foram medidas a dureza e permeabilidade aos gases de moldes congelados : equipamentos apropriados devem ser projetados para isto.

### 3. VIABILIDADE DE OPERAÇÃO NA FUNDIÇÃO EM MOLDES CONGELADOS

#### 3.1. ASPECTOS GERAIS DA OPERAÇÃO

Os vazamentos não apresentaram perigo do ponto de vista da possibilidade de descongelamento dos moldes, antes ou no momento da entrada do metal líquido, uma vez que a temperatura dos moldes foi controlada de modo a se ter um intervalo de 10 min. entre a retirada do molde do meio refrigerador e o vazamento; isto é, utilizou-se a temperatura máxima de -50°C para

os moldes (10 min. é o tempo de aquecimento ao ar do molde de -50 a 0°C).

Esta margem de segurança pode, sem dúvida, ser diminuída a valores inferiores. Desta maneira também pode ser diminuída a temperatura de congelamento dos moldes e serem feitos vazamentos sem apresentar perigo; por exemplo, o molde a -30°C ainda demora aproximadamente 5 min. para chegar a 0°C ao ar.

Sob este ponto de vista, o congelamento dos moldes a temperaturas inferiores ainda apresenta segurança, e também, é necessário uma quantidade menor de elemento refrigerador, o que influenciaria nos custos de produção.

É óbvio, no entanto, que o perigo de destruição do molde, por seu descongelamento, e consequente derrame do metal líquido, depende não só do tempo de "espera" do molde ao ar como, e principalmente, do tempo de aquecimento, quando nele é vazado o metal líquido, o qual por sua vez é função da temperatura de vazamento do líquido e da geometria do molde.

Assim, cada sistema metal/molde é um caso particular a ser analisado, antes de se efetuar uma operação de vazamento.

Em todos os casos analisados neste trabalho, a operação de vazamento se procedeu sem imprevistos: os moldes continuaram estáveis após total solidificação, sendo o lingote desmoldado por esboroamento, provocado por leves batidas nos moldes. Não se verificou adesão de areia à superfície dos lingotes em nenhum caso.

Quanto ao perigo de expulsão de líquido pela presença de vapor de água no interior do molde também não foi detectada a menor possibilidade

de ocorrência para os sistemas analisados (lingoteiras abertas). É de se supor que a quantidade de água formada na superfície interna dos moldes seja apenas suficiente para formar uma pequena película de vapor na interface metal/molde ou mesmo uma certa quantidade de vapor expulso pelo interior do metal líquido, sem causar danos.

Quanto a possibilidade de borbulhamento do vapor no líquido em solidificação, não foi detectado tal fenômeno em nenhum dos casos. Somente nos casos de condições mais rigorosas (moldes a  $-110^{\circ}\text{C}$  e com 6%), foi notado, tanto no vazamento do Pb, quanto do Al, um ruído característico da evaporação produzido por contato entre um elemento a alta temperatura e um meio qualquer, a baixa temperatura.

Outra característica importante a ser analisada é a total ausência de gases ou vapores durante o vazamento, consequência da não utilização de aglomerantes na areia, que, através de sua queima, produzem gases poluentes nos métodos clássicos de fundição.

### 3.2. CINÉTICAS DE DESCONGELAMENTO E SOLIDIFICAÇÃO

#### 3.2.1. DESCONGELAMENTO DO MOLDE NO VAZAMENTO

Para as diversas condições de confecção dos moldes foi medido o tempo necessário para, a partir das temperaturas de congelamento (-50, -70, -90 e -110°C), ser atingido 0°C, com o molde contendo o metal líquido.

Em todos os casos, o molde foi congelado à temperatura inferior a de ensaio (cerca de 20°C em excesso), sendo o vazamento efetuada ao ser atingida a temperatura desejada. Em todos os casos, mantiveram-se constantes as temperaturas de vazamento dos líquidos, a saber: 360°C para o Pb e 700°C para o Al.

Os resultados são apresentados numericamente, em termos de tempo total de descongelamento, na tabela 4.4 (a) e (b), para todos os casos.

Analisando, em primeiro lugar, o caso do vazamento de Pb (tabela 4.4.(a)), pode-se notar que apenas algumas tendências podem ser sugeridas: para um mesmo teor de água, a redução da temperatura do molde provoca o aumento do tempo de descongelamento, para quaisquer dos teores de umidade utilizados, como seria de se prever. Pode-se, ainda, observar que o efeito é mais acentuado nos moldes com os maiores teores de água, o que seria de se esperar, tendo em vista a maior massa de gelo a ser aquecida para uma mesma quantidade de areia. Resultado semelhante foi observado no descongelamento de moldes ao ar, conforme visto anteriormente: moldes contendo maior teor de água requeriam maior tempo para o descongelamento.

Analisando, assim, para uma mesma temperatura de congelamento, veremos que o aumento do teor de água produz aumento do tempo de descongelamento (seguindo uma horizontal da tabela (a)).

TEMPOS EM SEGUNDOS

Tcong. (°C) \ % água	AREIA 45-50			AREIA 90-100		
	2	4	6	2	4	6
-50	30	27	46	32	65	60
-70	28	48	33	29	(26)	48
-90	(6)	(27)	50	52	65	(16)
-110	40	56	80	(6)	50	52

(a)

Tcong. (°C) \ % água	AREIA 45-50			AREIA 90-100		
	2	4	6	2	4	6
-50	19	22	29	22	22	21
-70	(8)	27	25	28	(5)	25
-90	20	22	(42)	(14)	18	28
-110	18	(15)	21	26	28	(18)

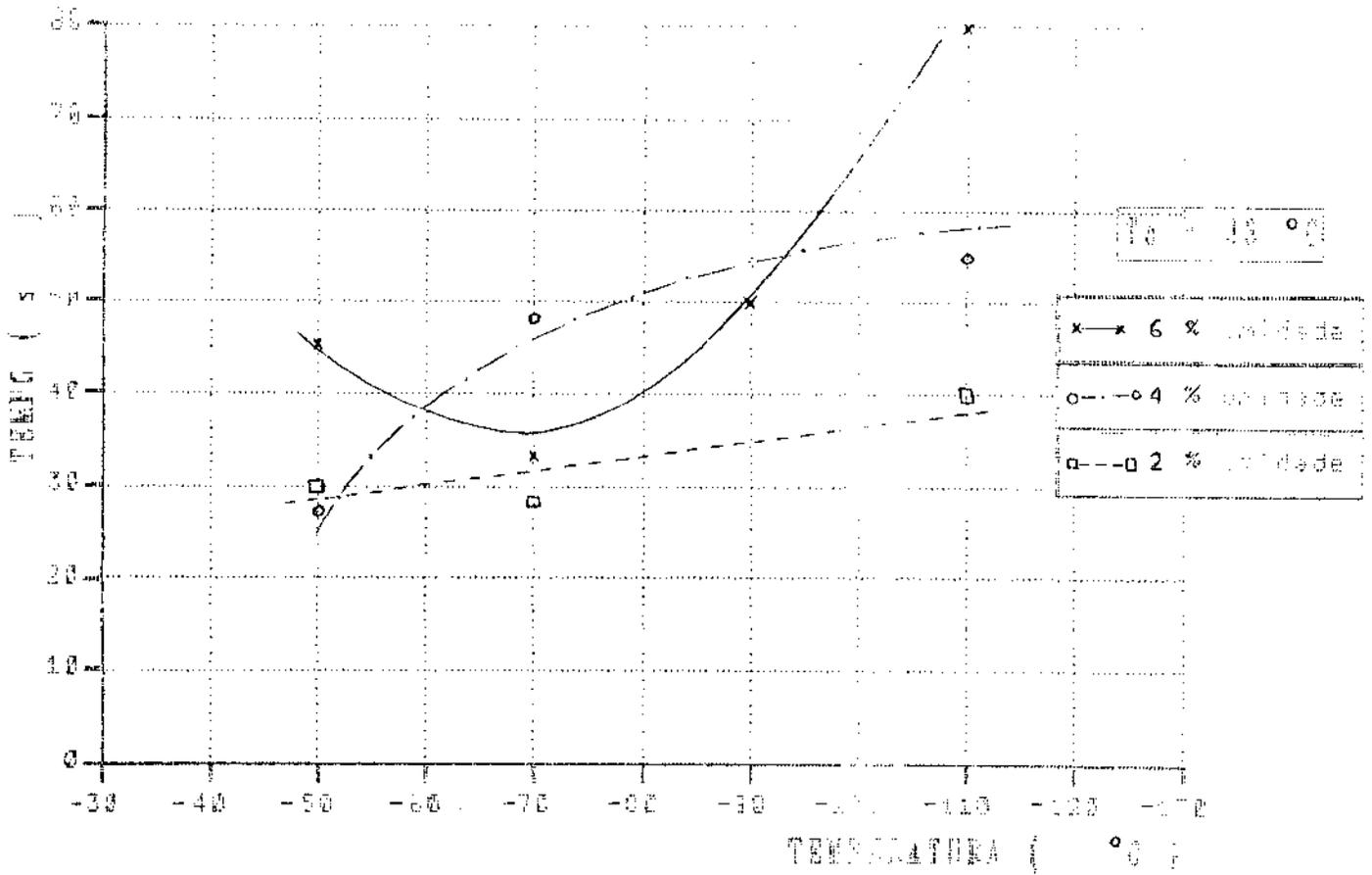
(b)

TABELA 4.4. - Tempo total de descongelamento (entre Tcong. e 0°C) de moídes em diferentes condições, quando do vazamento do metal líquido:

(a) Pb: Tv: 360°C

(b) Al: Tv: 700°C

METAL : Pb - AREIA : 100 g



METAL : Pb - AREIA : 100 g

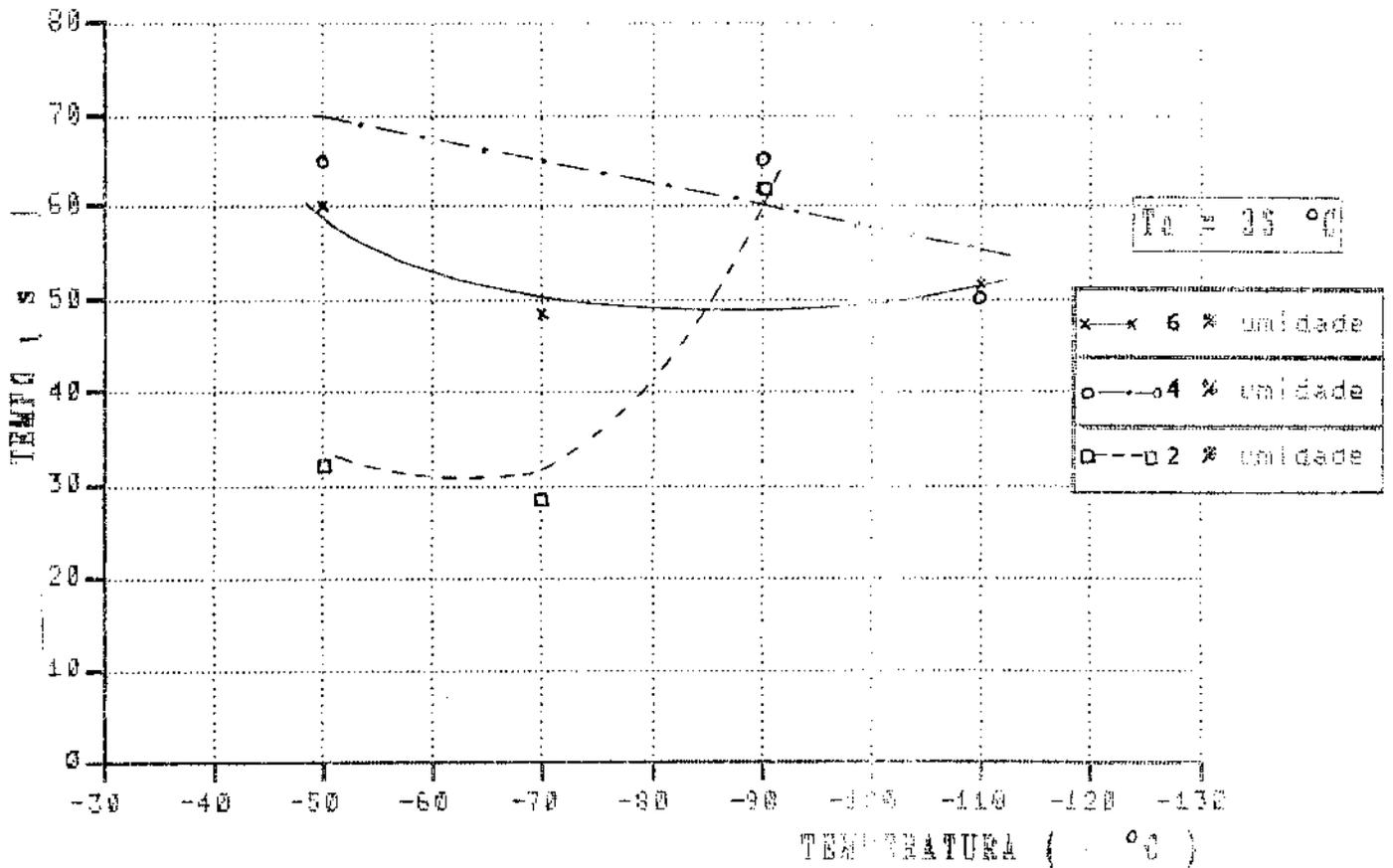
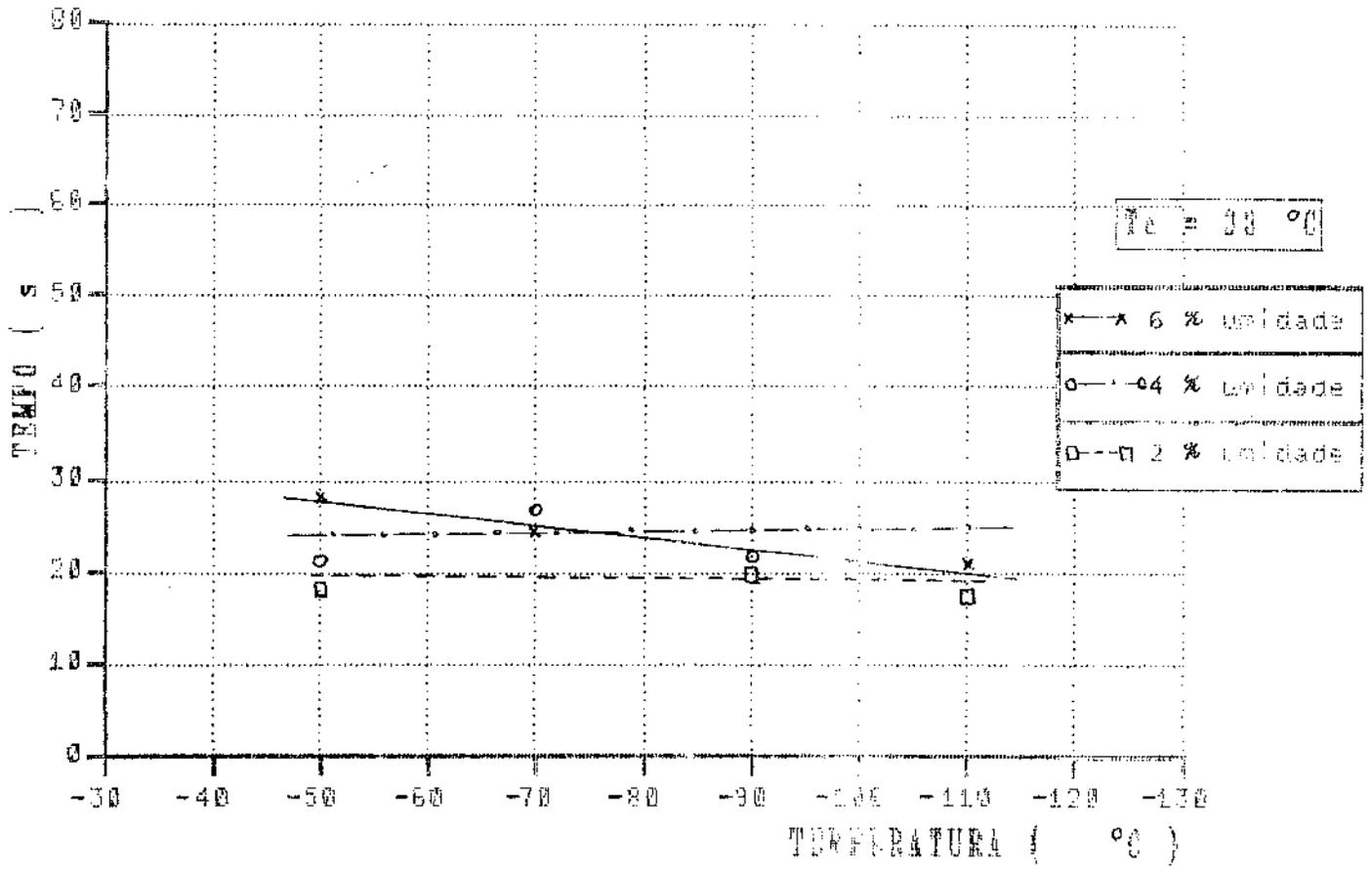


Fig. 4.8.- Variação do tempo de descongelamento dos moldes contendo Pb líquido, nas diferentes condições.



METAL : Al - AREIA : 00-100

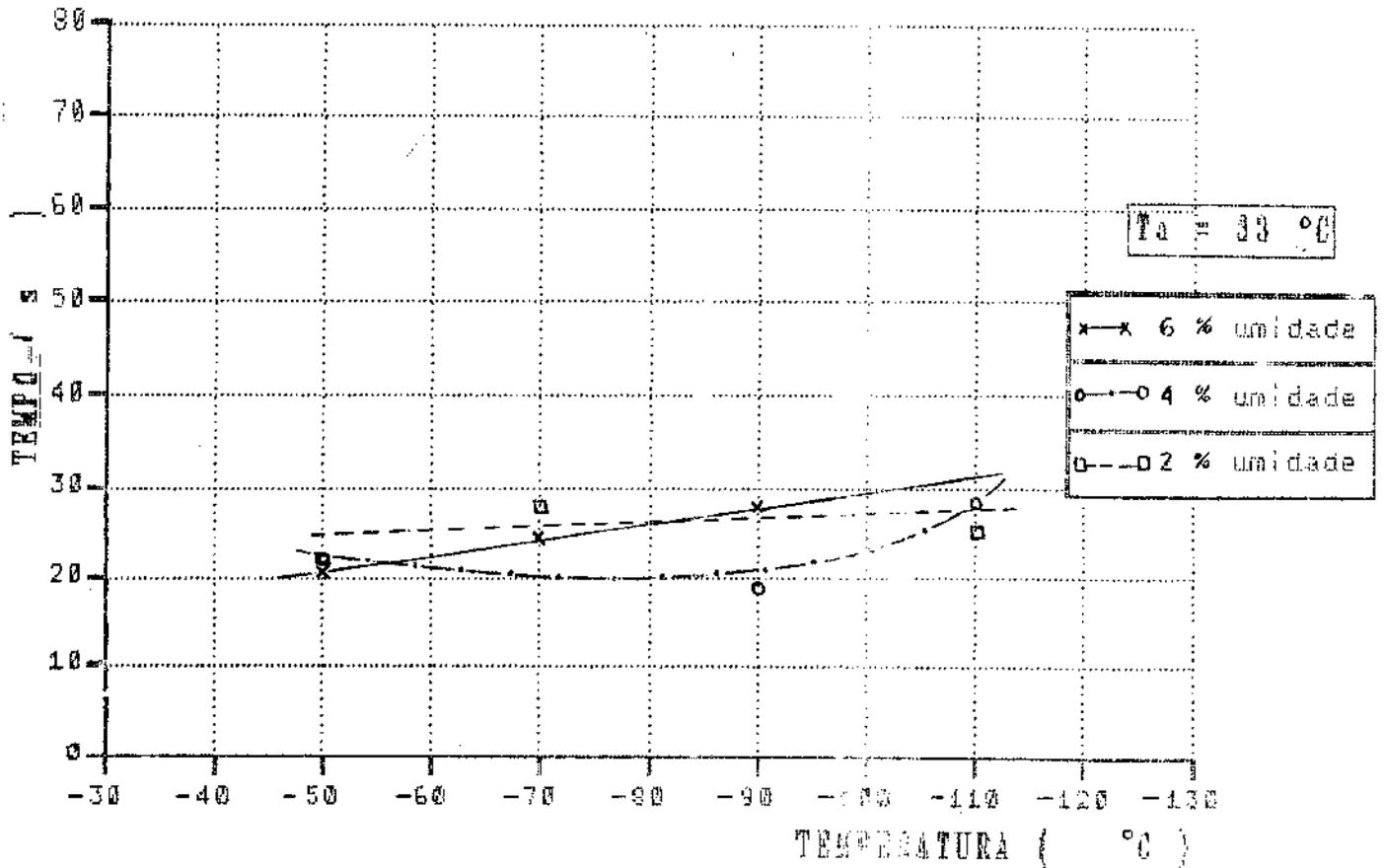


Fig. 4.9.- Variação do tempo de descongelamento dos moldes contendo Al líquido, nas diferentes condições.

Estes efeitos discutidos são observados para ambas as areias, havendo, no entanto, uma pequena diferença de comportamento, quando se trata da areia mais fina, 90-100 A.F.S. Neste caso, o tempo médio para o descongelamento parece ser maior do que no caso da areia 45-50: variações médias de tempos de 30 a 65 segundos são observadas para a areia 90-100, enquanto que variações médias em torno de 30-48 são observadas para a areia 45-50.

Este fato faz supor uma pequena diferença entre características térmicas das duas areias, anteriormente quando do congelamento e descongelamento ao ar, não detectada devido aos altos valores de tempos envolvidos naqueles fenômenos; mas sensível aos reduzidos tempos de descongelamento dos moldes contendo metal líquido: a areia 90-100 poderia apresentar uma maior refratariedade que a 45-50, porque possui grãos mais finos e aparentemente mais angulares que os grosseiros arredondados da areia 45-50. É de se supor que é obtida uma massa mais homogênea e compacta com a areia 90-100. A areia de maior granulometria teria maior volume de espaços vazios em seu interior e, portanto, menor resistência à passagem de calor, resultando no menor tempo para seu descongelamento.

Deve-se, no entanto, tomar um certo cuidado com tais afirmações, uma vez que os resultados obtidos somente mostram uma tendência de comportamento. Resultados mais seguros poderiam ser obtidos com análise de diferentes geometrias de moldes, por exemplo.

Numa tentativa de visualizar as tendências de comportamento discutidas são apresentados os gráficos da figura 4.8., onde é mostrada a variação do tempo de descongelamento com a temperatura do molde, na qual foi vazado o metal líquido. (Na tentativa de se aproximar dos efeitos reais, foram desconsiderados pontos considerados aleatórios).

Analisando agora os resultados obtidos quando do vazamento do Alumínio congelado em diferentes condições, temos os resultados apresentados, numericamente, na tabela 4.4.(b) e graficamente na figura 4.9.

De uma maneira geral, não parece haver influência das condições do molde (tipo de areia, teor de umidade e sua temperatura, no instante do vazamento) no tempo total de descongelamento. Tempos em torno de 20-28 segundos são obtidos em todos os casos.

Este resultado pode ser atribuído à alta temperatura do metal líquido vazado. É de supor que altas temperaturas de vazamento anulem quaisquer efeitos de pequenas variações na refratariedade de moldes, devidas às alterações nas condições de sua confecção, mantendo praticamente constante o tempo total de descongelamento. Assim, faixas de variação de tempos de descongelamento mais amplas serão obtidas para metais de menor ponto de fusão. Nestes casos, os tempos serão mais sensíveis às condições de confecção dos moldes, conforme observado para o Pb.

Deve-se lembrar, ainda, que a análise se restringiu a uma geometria específica de molde. Nestes casos, no entanto, o reduzido valor do tempo de descongelamento do molde (cerca de 20 segundos, em média, para o Alumínio vazado a 700°C) não representou qualquer inconveniente quanto à manutenção do líquido no interior do molde. Como será visto em itens seguintes, o tempo de solidificação do metal pode ser maior que o de descongelamento do molde, mas, quando isto ocorrer, uma camada suficiente de sólido capaz de manter o líquido, deverá ter sido já formada, conforme será discutido posteriormente.

### 3.2.2. TEMPO DE SOLIDIFICAÇÃO DO METAL

Os tempos totais de solidificação obtidos para lingotes solidificados em moldes congelados, nas diferentes condições analisadas, são apresentados numericamente na tabela 4.5. São apresentados, também, os valores do tempo de solidificação obtidos em moldes de areia com aglomerante tradicional e em coquilha com 3 mm de espessura de parede. As figuras 4.10 e 4.11 mostram graficamente os resultados.

TEMPOS EM SEGUNDOS

Tcong. (°C) \ % água	AREIA 45-50			AREIA 90-100		
	2	4	6	2	4	6
-50	30	15	20	45	29	19
-70	27	18	15	35	18	22
-90	25	20	15	36	23	21
-110	28	18	13	23	24	22
MOLDE DE RESINA: 33				43		
MOLDE METALICO : 13						

( a )

Tcong. (°C) \ % água	AREIA 45-50			AREIA 90-100		
	2	4	6	2	4	6
-50	56	41	28	73	62	57
-70	62	21	27	70	64	39
-90	60	38	28	79	64	41
-110	59	27	30	71	57	36
MOLDE DE RESINA: 53				61		
MOLDE METALICO : 10						

( b )

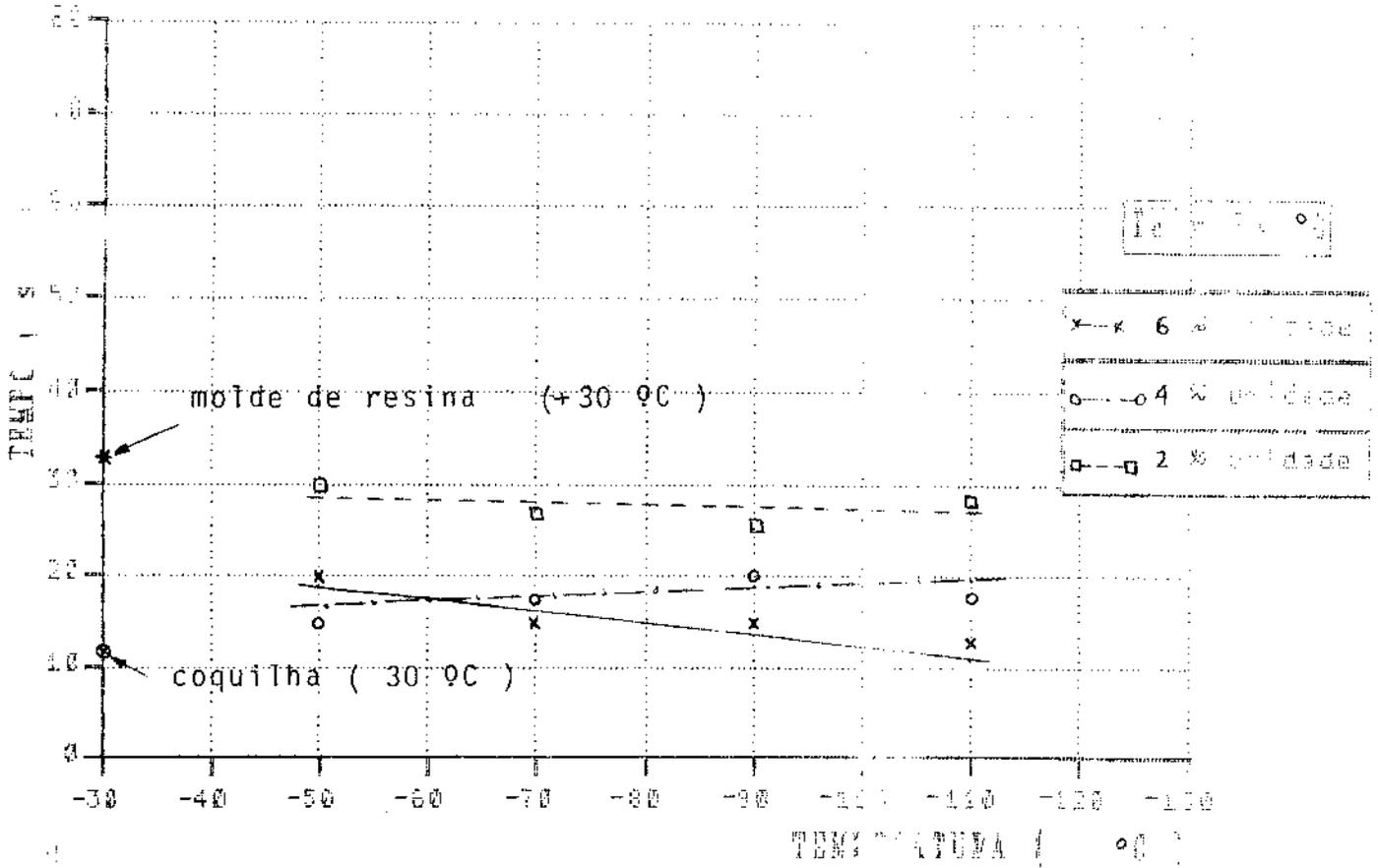
TABELA 4.5. - Tempos totais de solidificação em moldes congelados, em diferentes condições:

(a) Pó: T<sub>v</sub>: 360°C

(b) A: T<sub>v</sub>: 700°C

TEMPO DE SOLIDIFICAÇÃO DO

AREIA 40-50



AREIA 90-100

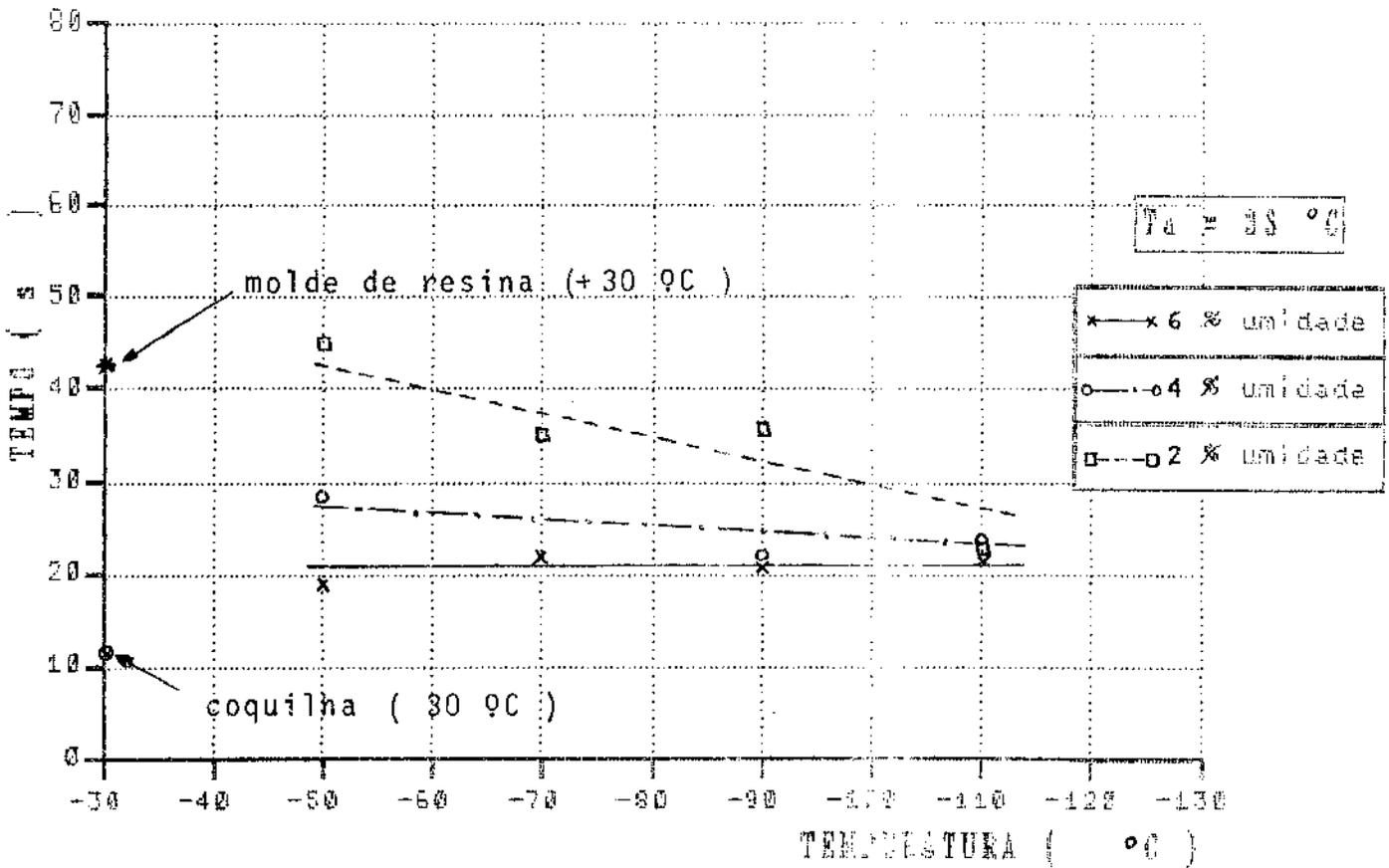
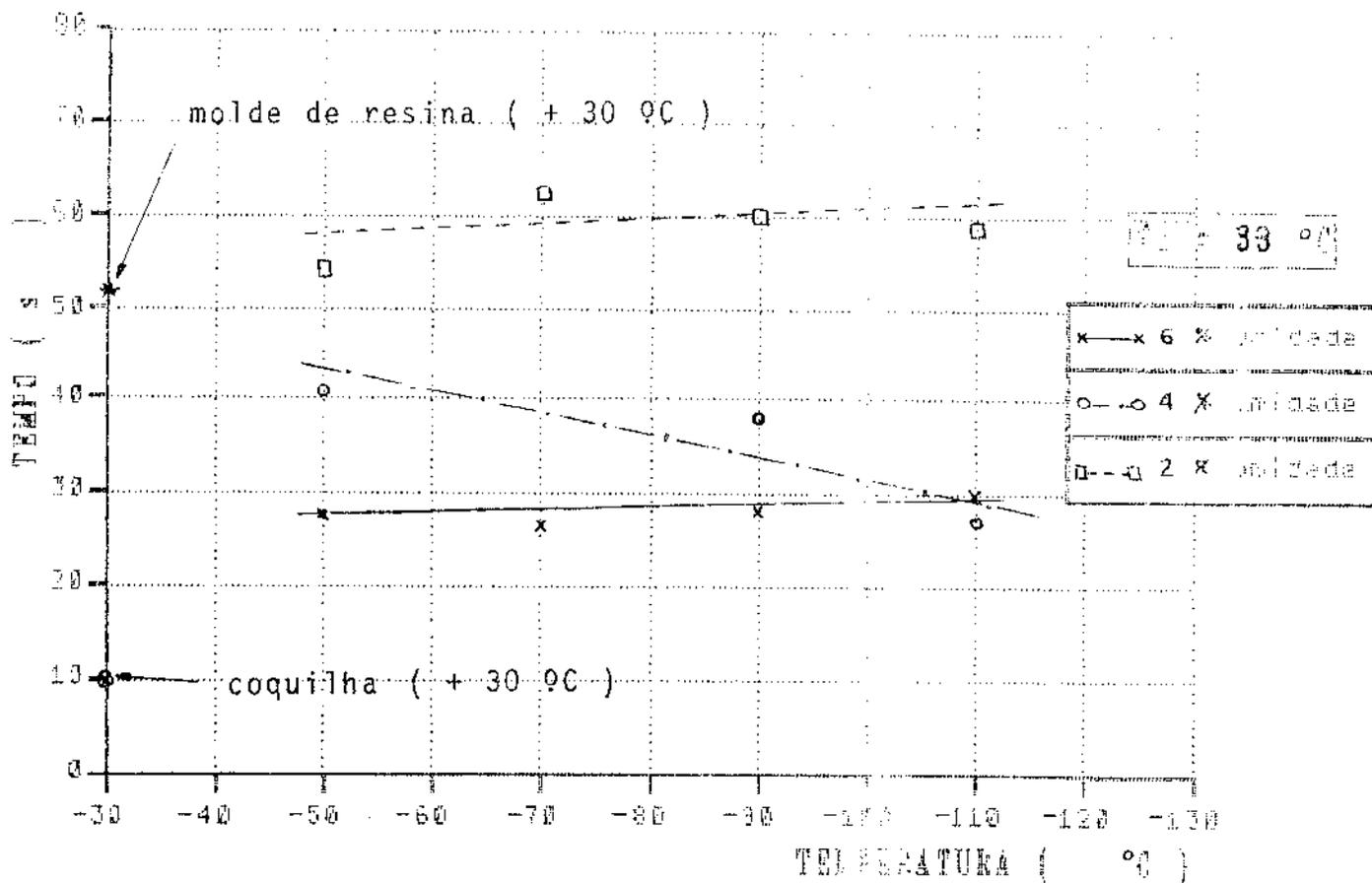


Fig. 4.10.- Tempo total de solidificação do Pb vazado em moldes congelados em diferentes condições.

TEMPO DE SOLIDIFICAÇÃO DO AL

AREIA 40-50



AREIA 90 -100

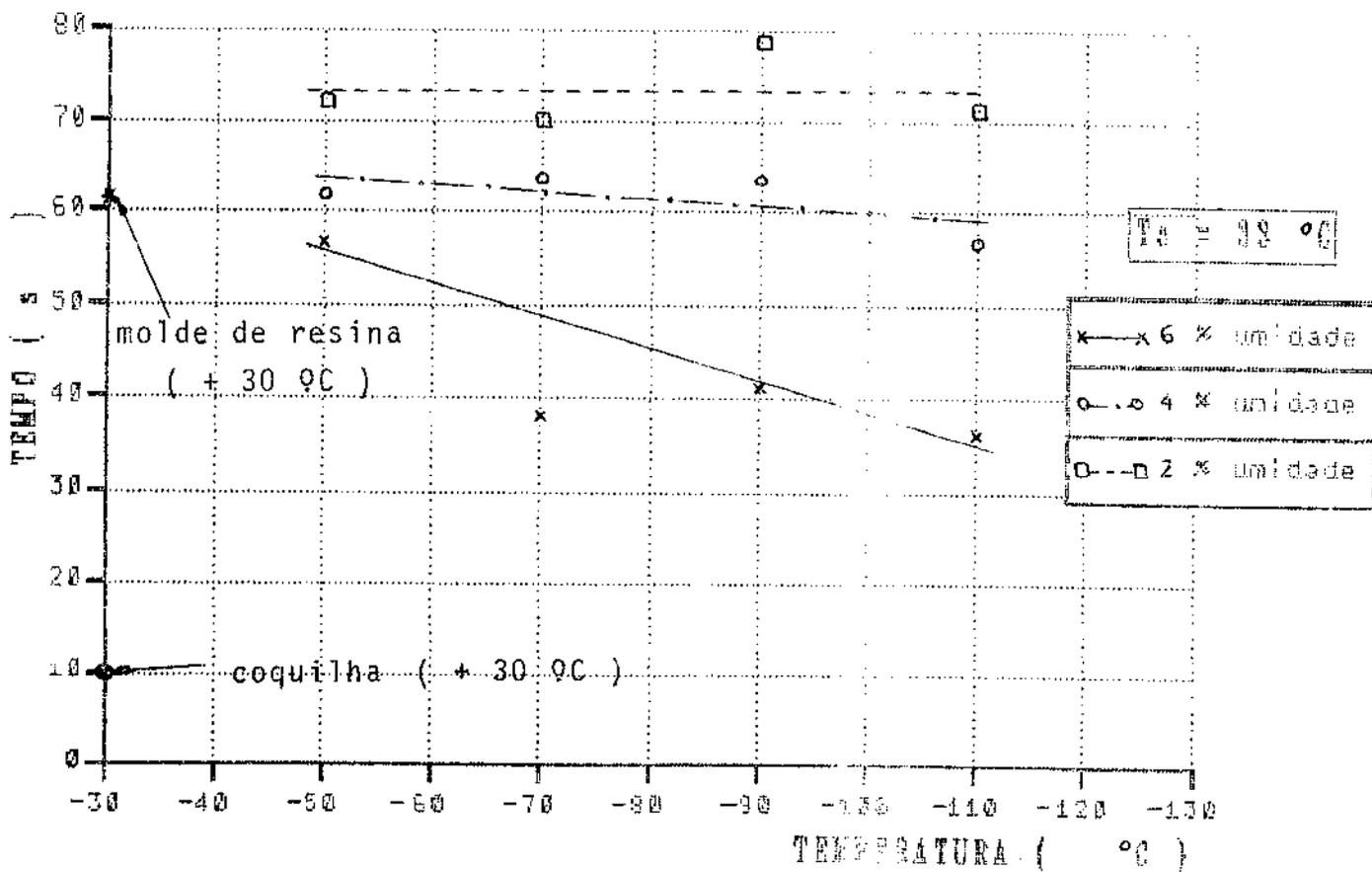


Fig. 4.11.- Tempo total de solidificação do Al vazado em moldes congelados em diferentes condições.

Analisando primeiramente o caso do Pb, podemos notar que os tempos de solidificação, em todos os casos, são inferiores (cerca de 50%) ao obtido com o molde de resina, como seria de se prever, dadas as reduzidas temperaturas envolvidas, e superiores aos obtidos em coquilha (cerca de 100%, em alguns casos mas podendo chegar, para as menores temperaturas de molde, a aproximadamente o mesmo tempo, no caso de areia grossa. Assim, a cinética de solidificação do Pb em moldes congelados se mostra intermediária entre a ocorrida em moldes metálicos e em moldes refratários convencionais. Ora o tempo se aproxima dos obtidos em moldes metálicos (areia grossa, porosa, baixa temperatura de molde e alto teor de água), ora se aproxima ou mesmo supera o obtido em moldes de areia convencionais (para areia fina, com maior temperatura e menor teor de água).

Os resultados obtidos com o vazamento em moldes aglomerados com resinas mostram, confirmando o que foi dito anteriormente, que a areia fina é mais refratária que a grossa.

Analizando a influência dos parâmetros estudados, dos valores da tabela 4.5 (a) pode-se observar claramente que o aumento do teor de gelo na areia reduz o tempo total de solidificação do líquido, o que pode ser verificado para ambas as areias e também para os dois metais utilizados. Pode-se observar também, que para uma mesma quantidade de gelo não há alteração sensível no tempo de solidificação com a redução da temperatura do molde (somente em alguns casos, como areia 45-50, contendo 6% de água ou areia 90-100, contendo 2%, casos que aparentemente não obedecem uma lógica clara foi notada uma redução do tempo de solidificação com a redução da temperatura do molde).

Assim, parece que a redução do tempo de solidificação em moldes congelados depende do aumento de teor de gelo presente e não da temperatura do molde. Este fato parece indicar que a variação do tempo de solidificação depende da quantidade de vapor gerado: quanto maior sua quantidade, mais facilmente calor é extraído do metal e menor o seu tempo de solidificação. Pode-se-ia pensar que o vapor produz esfriamento do metal, passando pelo seu interior.

Deste modo, o tempo de solidificação não dependeria de variações na taxa de extração de calor pelo molde, o que concorda com os resultados obtidos, os quais mostram a independência do tempo com a temperatura do molde.

Uma outra observação que concorda com o modelo proposto, de passagem de vapor pelo seio do líquido, provocando o seu resfriamento, pode ser apreendida dos resultados obtidos quando à influência do tipo de areia: os tempos de solidificação são sensivelmente menores para metais solidificados em moldes de areia 45-50 (grossa) que nos de areia 90-100 (fina). Pode-se pensar que no caso de areia grossa, provavelmente menos compacta, vapores são mais facilmente liberados.

Assim, pode-se verificar que, para a geometria do molde e tipos de areias analisadas, a cinética de solidificação de metais parece mais dependente da quantidade de gelo/vapor a ser formado do que da cinética de resfriamento, propriamente dita, dos moldes.

Os mesmos resultados foram obtidos para a solidificação do Alumínio: tempos variando de 30 a 70 segundos foram registrados (para 50-60 segundos em molde convencional) e valores estes dependentes do teor de água adicionado à areia (maior teor, menor tempo) e

do tipo de areia (areia mais fina, maior tempo). Também para o caso de Al, a variação da temperatura do molde, de -50 a -110 °C, não influencia no tempo total de solidificação.

Para o caso do Al, metal de mais alto ponto de fusão pode-se observar que em nenhuma das situações analisadas, o tempo de solidificação se aproxima do tempo obtido na coquilha utilizada. A cinética de solidificação do Al em moldes congelados se aproxima mais da cinética em moldes refratários, embora para a areia mais grosseira e o maior teor de água, o tempo total de solidificação fique intermediário entre os obtidos em coquilha e molde aglomerado com resina.

Serão analisados, a seguir, a compatibilidade entre o tempo de solidificação do metal líquido e o descongelamento do molde, além das variações estruturais de lingotes obtidos como consequência das variações nas cinéticas de solidificação observadas nos diferentes casos.

### 3.2.3. VIABILIDADE DA FUNDIÇÃO ( $t_s \times t_d$ )

Para a fundição do Pb, em geral, pode ser considerado que, para todas as umidades e temperaturas de congelamento dos moldes, o tempo de descongelamento dos moldes foi maior que o tempo de solidificação total do metal líquido, como pode ser observado na tabela 4.6, sendo isto observado nas duas areias utilizadas.

do tipo de areia (areia mais fina, maior tempo). Também para o caso de Al, a variação da temperatura do molde, de -50 a -110 °C, não influencia no tempo total de solidificação.

Para o caso do Al, metal de mais alto ponto de fusão pode-se observar que em nenhuma das situações analisadas, o tempo de solidificação se aproxima do tempo obtido na coquilha utilizada. A cinética de solidificação do Al em moldes congelados se aproxima mais da cinética em moldes refratários, embora para a areia mais grosseira e o maior teor de água, o tempo total de solidificação fique intermediário entre os obtidos em coquilha e molde aglomerado com resina.

Serão analisados, a seguir, a compatibilidade entre o tempo de solidificação do metal líquido e o descongelamento do molde, além das variações estruturais de lingotes obtidos como consequência das variações nas cinéticas de solidificação observadas nos diferentes casos.

### 3.2.3. VIABILIDADE DA FUNDIÇÃO ( $t_s \times t_a$ )

Para a fundição do Pb, em geral, pode ser considerado que, para todas as umidades e temperaturas de congelamento dos moldes, o tempo de aquecimento dos moldes foi maior que o tempo de solidificação total do metal líquido, como pode ser observado na tabela 4.6, sendo isto observado nas duas areias utilizadas.

H	AREIA 45 - 50				AREIA 90 - 100		
	$t_s$ (s)	$\Delta t$	$t_a$ (s)	T (°C)	$t_s$ (s)	$\Delta T$	$t_a$ (s)
2 %	30	0	30	- 50	45	13	32
	27	01	28	- 70	35	06	29
	25	-	6 ↗	- 90	36	26	62
	28	12	40	- 110	23	-	6 ↗
4 %	15	12	27	- 50	29	36	65
	18	30	48	- 70	18 ↗	-	26 ↗
	20	-	27 ↗	- 90	23	42	65
	18	38	56	- 110	24	26	50
6 %	20	26	46	- 50	19	41	60
	15	18	33	- 70	22	26	48
	15	35	50	- 90	21	-	16 ↗
	13	67	80	- 110	22	30	52

H = Teor de umidade adicionado no molde

$t_s$  = Tempo de solidificação total do metal

$t_a$  = Tempo de aquecimento, até 0 °C, do molde contendo o metal líquido

Tabela 4.6.- Comparação  $t_s$  x  $t_a$  para o Pb

H	AREIA 45 - 50			T (°C)	AREIA 90 - 100		
	t <sub>s</sub> (s)	Δ t	t (s)		t <sub>s</sub> (s)	Δ t	t (s)
2 %	56	37	19	- 50	73	41	22
	62	-	⑧ ↗	- 70	70	42	28
	60	40	20	- 90	79	-	⑭ ↗
	59	41	18	- 110	71	45	26
4 %	41	19	22	- 50	62	40	22
	⑮ ↗	-	27	- 70	64	-	⑤ ↗
	38	16	22	- 90	64	46	18
	27	-	⑮ ↗	- 110	57	29	28
6 %	28	01	29	- 50	57	36	21
	27	02	25	- 70	39	14	25
	28	-	④ ↗	- 90	41	13	28
	30	11	21	- 110	36	-	⑮ ↗

H = Teor de umidade adicionado no molde

t<sub>s</sub> = Tempo de solidificação total do metal

t<sub>a</sub> = Tempo de aquecimento, até 0 °C, do molde contendo o metal líquido.

Tabela 4.7.- Comparação t<sub>s</sub> x t<sub>a</sub> para o Al

Assim, para a geometria e dimensão dos moldes, utilizados, estes permitem a solidificação total do Pb nele contido, sem atingir  $0^{\circ}\text{C}$ ; desde que, é óbvio, a temperatura de vazamento do metal seja igual ou inferior a  $360^{\circ}\text{C}$ .

Da tabela 4.6 pode-se observar que um maior fator de segurança, isto é, a diferença entre o tempo de Aquecimento e o de solidificação total do metal é atingido para os moldes de areia mais fina e para os maiores teores de água utilizados para a moldagem pois os tempos de descongelamento do molde são mais sensíveis a esses parâmetros do que o tempo total de solidificação. Assim, fatores que favorecem preferencialmente o aumento do tempo de descongelamento do molde aumentam o fator de segurança no vazamento.

No caso da fundição de Al, o tempo de descongelamento dos moldes é sensivelmente menor que o tempo de solidificação total do metal líquido, como consequência da maior temperatura do vazamento (aproximadamente 100% que o Pb); para a maioria das condições analisadas, conforme pode ser observado na Tabela 4.7.

Para o Al, de maneira oposta ao observado para o Pb, o tempo de solidificação do metal é mais sensível às variações dos parâmetros analisados (teor de água, granulometria da areia, temperatura do molde) do que o tempo de Aquecimento do molde, devido à alta temperatura de vazamento do Al, que impõe um drástico gradiente térmico ao molde, quando vazado. Como consequência, observa-se que maiores diferenças entre  $t_d$  e  $t_s$  ocorrem em situações onde o  $t_s$  é alto: areia fina e reduzido o teor de água.

Para o caso do Al, como esta diferença é favorável a ts, as condições de vazamento mais seguras seriam aquelas em que estas diferenças sejam mínimas: alto teor de água e areia grossa. Isto é, para o Al, fatores que favoreçam preferencialmente a redução do tempo de solidificação aumentam o fator de segurança no vazamento.

Embora, durante a fundição de Al, os moldes tenham atingido 0°C em todos os casos, antes do metal se solidificar totalmente, não foi observado qualquer sinal de colapso nos moldes, o que indica que, no momento do molde atingir 0°C, já estava formada uma parede sólida do metal com uma espessura e resistência suficientes para manter o metal líquido no seu interior.

Os resultados obtidos, mostram que, para o Pb, os moldes atingem 0°C somente após solidificação total do líquido nele contido, e que, para o Al, atingem 0°C antes da sua solidificação total, porém não apresentando nenhum tipo de sinal de colapso, viabilizam o processo de fundição em moldes congelados para utilização com metais de baixo ponto de fusão, do ponto de vista da resistência do molde versus solidificação do metal.

Deve ser reforçado, novamente que estes resultados dependem da geometria do molde, suas dimensões e da temperatura de vazamento dos metais, fatores que alteram totalmente as trocas térmicas envolvidas. Assim, para cada sistema metal/molde devem ser buscadas as condições adequadas de confecção do molde e vazamento do metal líquido.

#### 4. QUALIDADE DO FUNDIDO OBTIDO EM MOLDES CONGELADOS

##### 4.1. QUALIDADE SUPERFICIAL DOS LINGOTES

Quando comparados entre si, os lingotes obtidos nos moldes congelados, não foram observadas diferenças nas suas superfícies externas, quanto a rugosidade ou defeitos superficiais, para os dois metais, nas diferentes condições de umidade, temperatura dos moldes, e granulometria das areias utilizadas.

Quando comparados os lingotes obtidos em molde metálico e os de moldes congelados, nota-se uma grande diferença, sendo que os de coquilha apresentam uma superfície totalmente lisa, dada a boa qualidade da superfície interna, polida da coquilha, enquanto os obtidos nos moldes congelados, uma certa rugosidade, decorrente da porosidade da areia dos moldes, foi observada, como era de se prever.

Por outra parte, ao comparar os fundidos obtidos nos moldes de referência aglomerados com resina e os obtidos nos moldes congelados, pode-se observar que a superfície dos lingotes de moldes congelados são pouco mais rugosos embora não comprometendo a qualidade do fundido, do que as obtidas com os moldes de resina furânica. Tal fato, poderia ser explicado tendo em vista que a parede em contato com o metal líquido que solidifica, formando a primeira camada de metal sólido, apresenta mais rapidamente maior porosidade ao evaporar o gelo que aglomera a areia, liberando os intertícios entre os grãos de areia, do que quando da queima de aglomerantes convencionais, os quais não são totalmente eliminados (vide dificuldade de recuperação de areia de fundição contendo determinados tipos de aglomerantes).

#### 4.2. RECHUPES

Nas figuras 4.12 a 4.15 são mostradas as macroestruturas dos lingotes obtidos em diferentes condições nos moldes congelados; e onde podem ser observados os rechupes resultantes da contração de solidificação nos dois metais.

Tanto para o caso de Chumbo quanto para o Alumínio, observa-se que as diferentes condições de temperatura do molde, granulometria da areia e teor de água utilizada, não interferem de maneira sensível na forma, localização e volume dos rechupes ocasionados. Em todos os casos são notados rechupes cônicos localizados no centro dos lingotes, de características semelhantes aos obtidos em moldes de areia aglomerada com resina. Este fato pode indicar que as variações na cinética de solidificação (nucleação e crescimento do Chumbo e do Alumínio quando solidificados em moldes congelados, em relação a solidificação em moldes de areia convencionais não são suficientes para promover profundas modificações na estrutura sólida em formação, que refletissem na distribuição dos vazios de contração.

Nos itens que se seguem serão observadas tais modificações na estrutura do fundido.

#### 4.3. MACROESTRUTURAS

As macroestruturas obtidas em todos os casos são mostrados nas figuras 4.12 e 4.13 para o Chumbo e 4.14 e 4.15 para o Alumínio.

Da análise das figuras pode-se observar que as macroestruturas dos fundidos de referência para Al e Pb, nas duas areias utilizadas, apresentam grãos não direcionados, de grande

tamanho. Não são observadas zonas colunares nem zonas coquilhadas, como seria de se prever, tratando-se de moldes refratários.

Para o caso do Chumbo vazado em moldes congelados em diferentes condições pode ser observado que as estruturas obtidas não diferem substancialmente das obtidas com o molde de resina, para o menor teor de água utilizado e, o efeito se mantendo para todas as temperaturas e para as duas areias testadas.

Pode-se notar, no entanto, que o aumento do teor de água no molde resulta numa tendência ao aparecimento de zona colunar. Esta tendência é mais acentuada para a areia mais grosseira.

Comparando-se as estruturas obtidas com os valores de tempos de solidificação correspondentes (tabela 4.5.1a), observa-se claramente que as estruturas colunares são obtidas em situações de maior severidade de extração de calor, isto é, para os menores tempos de solidificação (obtidos para p.ex; solidificação do chumbo em moldes de areia 45-50, contendo 6% de água, independentemente da temperatura do molde).

Assim, a estrutura formada está diretamente relacionada com o tempo total de solidificação do lingote, e, portanto, dependendo dos parâmetros analisados (granulometria da areia, teor de água, temperatura do molde) da mesma maneira que a cinética de resfriamento, discutida amplamente em itens anteriores.

Deve ser comentado que os pequenos grãos em regiões de alguns lingotes são grãos superficiais recristalizados durante o polimento das amostras (o Chumbo recristaliza a muito baixas tensões).

Para o caso do Alumínio, cujas macrografias são mostradas nas figuras 4.15 e 4.16, pode-se observar as mesmas tendências observadas para o caso do chumbo: os lingotes de Al obtidos com moldes de areia 45-50 congelada apresentam tendência a formação de zonas colunares com o aumento do teor de umidade, para todas as temperaturas, isto, como uma consequência da maior velocidade de extração de calor provocado pelo aumento da quantidade de gelo presente na mistura.

Comparando-se o quadro de macroestruturas obtidas com os correspondentes tempos de solidificação, mostrados na Tabela 4.5 (6), pode-se novamente relacionar o menor tempo de solidificação à formação de estrutura colunar. Assim, os parâmetros que interferem na velocidade e direcionalidade da extração de calor pelo molde congelado, interferem também, de maneira direta na estrutura resultante: maior a velocidade, maior tendência a formação de estrutura colunar, de uma maneira geral.

Pode-se depreender ainda da análise das estruturas obtidas, que não parece existir influência da rugosidade do molde na formação de zonas estruturais nas duas areias utilizadas, uma vez que os resultados não mostraram variações nas estruturas que não aquelas previstas pelas alterações nos regimes de extração de calor.

H = 2x

H = 4x

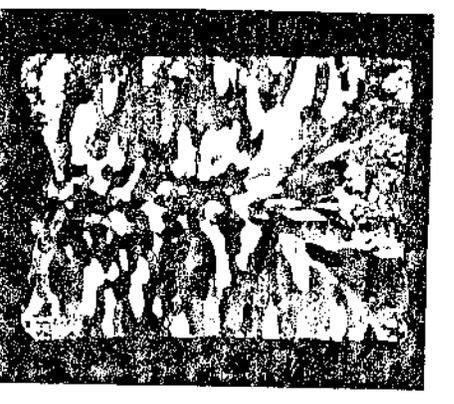
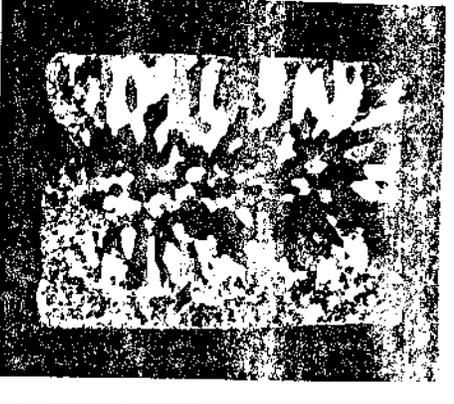
H = 6x



T = - 110 °C



T = - 90 °C



T = - 70 °C



T = - 50 °C

Referencia ( areia  
com resina )

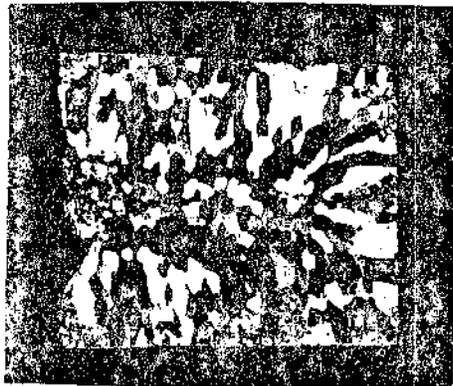
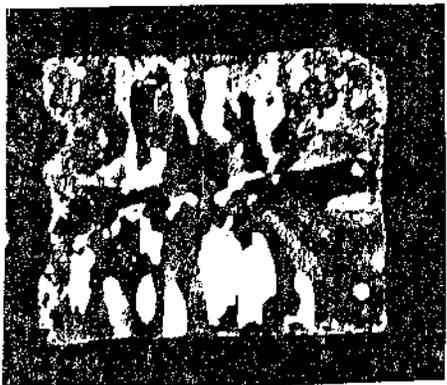
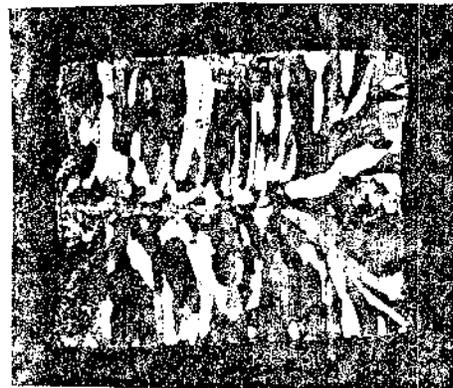
Fig. 4.12 Macrografias obtidas de lingotes de Pb, areia 45-50 Dimensões reais



H = 2%

H = 4%

H = 6%



T = - 110 °C

T = - 90 °C

T = - 70 °C

T = - 50 °C

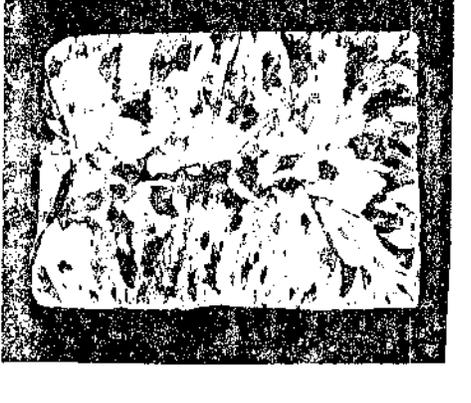
Referencia ( areia  
com resina )

Fig. 4.13 Macrografias obtidas de lingotes de Pb, areia 90-100  
Dimensões reais

H= 25

H= 45

H= 65



Referencia ( areia  
com resina )

T= - 110 °C

T= - 90 °C

T= - 70 °C

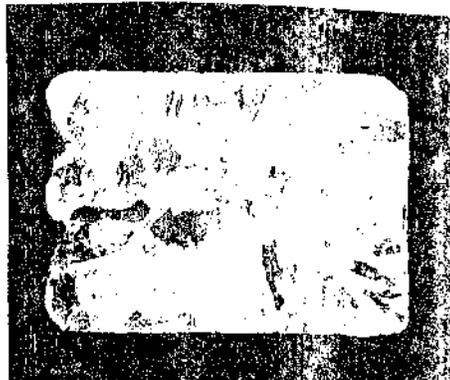
T= - 50 °C

Fig. 4.14 Macrografias obtidas de lingotes de Al, areia 45-50 Dimensões reais.

H= 2



H= 4



H= 6



Referencia ( areia  
com resina )

Fig. 4.1.5 Micrografias obtidas de lingotes de Al, areia 90-100  
dimensões reais

T= - 110 °C

T= - 90 °C

T= - 76 °C

T= - 50 °C

#### 4.4. POROSIDADE

Foram obtidas micrografias para análise de porosidade nos lingotes solidificados em moldes em condições limites: 2 % e 6 % de teor de água e -50 e -110 °C, para ambas areias. Os resultados são mostrados nas fig. 4.16/17.

Para o caso do Chumbo, quando observadas as duas referências, isto é, lingotes obtidos em moldes de diferentes areias aglomeradas com resina, pôde-se observar pela Fig. 4.16, que, para ambas as areias, são detetados nos lingotes, uma pequena quantidade de poros isolados, provavelmente consequência de gases gerados pela queima de aglomerantes das areias que eventualmente podem ficar retidos. Podem ainda ser consequência da occlusão de gases no interior do líquido que tiveram dificuldade de evacuação por entre os espaços entre os grãos de areia, preenchidos com a resina aglomerante.

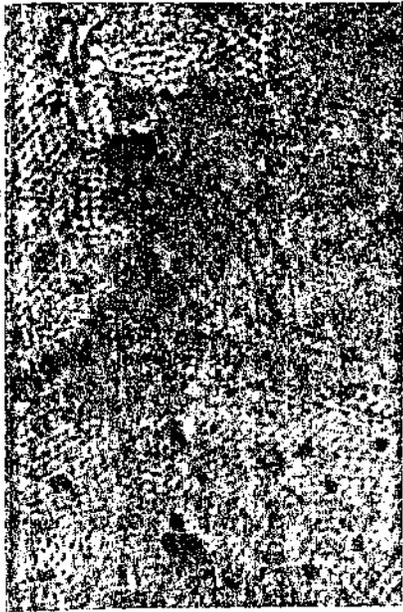
É pouco provável que a porosidade eventualmente observada seja vazios de contração, uma vez que, segundo analisado anteriormente, em todos os lingotes obtidos observou-se rechupes semelhantes, centrais de dimensões praticamente invariantes com as condições do molde utilizado. Além disso, as porosidades observadas apresentam forma arredondada e com superfície interna oxidada, característica de presença de gases.

Quanto aos lingotes obtidos em moldes congelados, os seguintes resultados são observados: os lingotes solidificados em moldes de areia fina ( 90-100 ) não apresentam porosidades para as umidades ( 2 e 6 % ) e temperaturas ( -50 - 110 °C ) analisadas.

AREIA 45 - 50

REFERENCIA

( Areia com resina )



90  
+

- 50



2 %

- 110



AREIA 90 - 100

REFERENCIA

( Areia com resina )



- 110



5 %

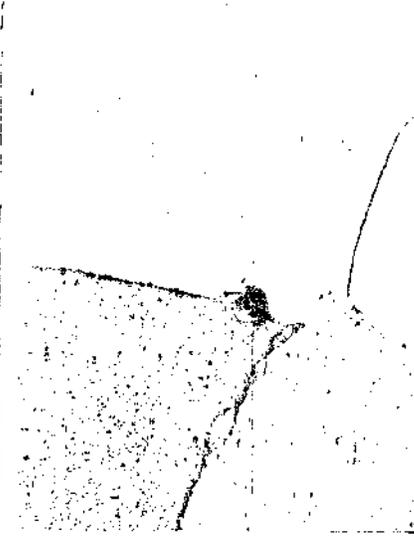
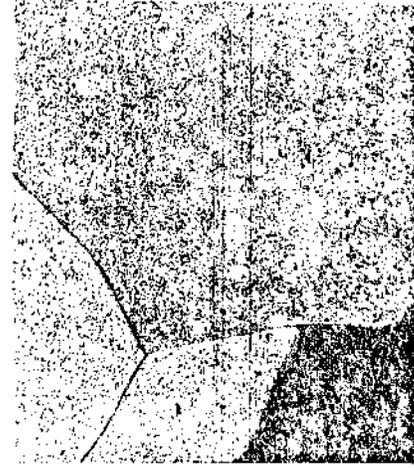
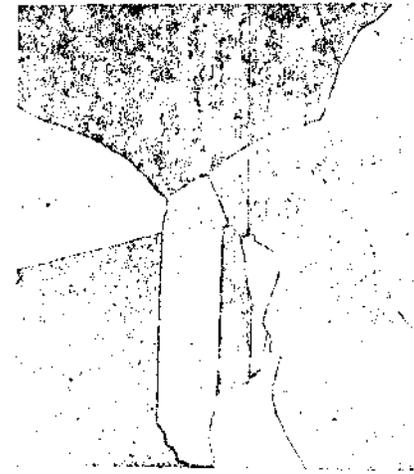


Fig. 4.16.- Microestruturas de Pb obtidas com diferentes condições do molde. Aumento 27 X.

Para a areia mais grossa ( 45-50 ) pode-se observar ainda alguma porosidade para o menor teor de água e maior temperatura do molde ( 2 % e - 110 °C ); em todos os outros casos, não foi possível detectar porosidade aparente . Estes resultados, mostrando a redução e mesmo eliminação da porosidade de lingotes quando solidificados em moldes congelados ( aglomerados com água ) pode-se constituir numa importante vantagem sobre outros processos de fundição. ,

Este comportamento pode ser explicado pela rápida evaporação da água , a qual, evoluindo pelo interior do metal líquido, arrastaria consigo gases eventualmente retidos, reduzindo a porosidade do metal fundido. Assim, para maiores teores de água no molde, mais seriam sentidos os efeitos de eliminação de porosidade, como observado.

Deve-se comentar que este efeito, no entanto, depende da temperatura de vazamento do líquido ( vapores devem evoluir em metal líquido, sob risco de ficar retidos se a solidificação se iniciar ) e os teores de água devem ser limitados.

A ideia de que os fatores gerados pelo descongelamento da água são eliminados pelo seio do líquido foi anteriormente colocada quando da discussão da variação do tempo de solidificação de lingotes em moldes congelados, quando observou-se que tais tempos são dependentes do teor de água e não da temperatura do molde, ( Vide item 3.2.2. ); e este fato foi atribuído ao resfriamento provocado pela passagem de vapores pelo líquido.

Quanto ao Al, a variação de sua porosidade interna com as condições de solidificação, é mostrada na fig. 4.17.

As micrografias obtidas dos lingotes de Al fundidos em moldes de areia fina ( 90-100) e grossa (45-50) aglomerados com resina furânica apresentaram resultados similares quanto a quantidade de poros e o tamanho dos mesmos.

Isto deve-se principalmente a que os moldes , embora confeccionados com diferentes areias , possuíam uma permeabilidade similar, decorrente do preenchimento dos espaços inter-granulares com a resina, o que, a sua vez, permitia uma evacuação de gases aproximadamente igual nos dois casos, como comentado anteriormente pelo caso do Chumbo.

Ao examinar as micrografias obtidas de lingotes fundidos em moldes de areia fina e grossa congelados, pode-se observar que os fundidos com areia fina apresentam maior número de poros, e de maior tamanho, que os lingotes obtidos com areia grossa, para uma mesma condição de temperatura e umidade.

Como para o caso do Al, de maneira diferente à ocorrida com o Pb, os moldes descongelaram totalmente durante a solidificação do metal, deve haver aumento significativo da permeabilidade do molde quando do seu descongelamento ainda durante a solidificação. Os moldes congelados, neste caso, devem ser bem mais permeáveis que os aglomerados com resina.

Assim, a menor quantidade de poros observados nas micrografias dos lingotes obtidos em moldes de areia grossa, em relação ao caso de areia fina, é consequência da melhor liberação

AREIA 45 - 50

REFERENCIA

( Areia com resina )



19C  
f

- 50



- 110

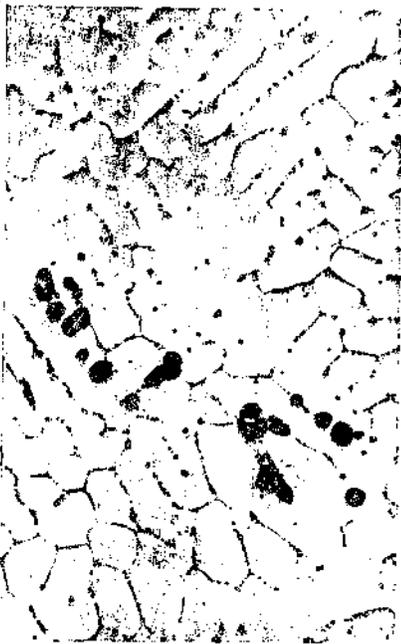


2 %

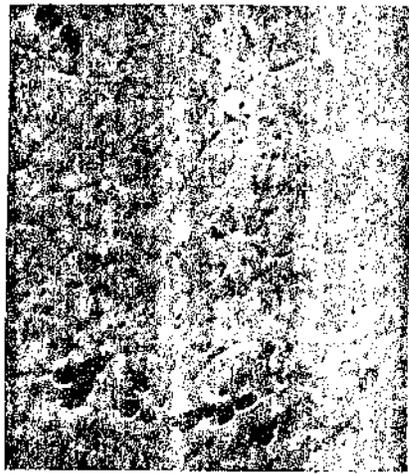
AREIA 90 - 100

REFERENCIA

( Areia com resina )



- 50



- 110



3 %

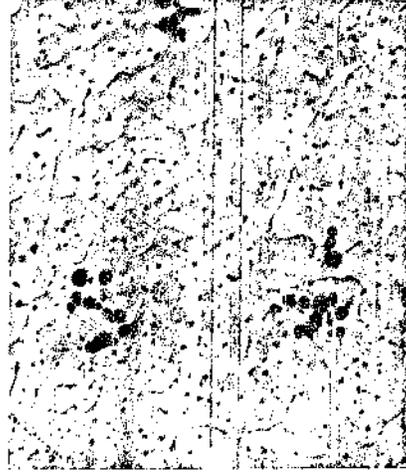
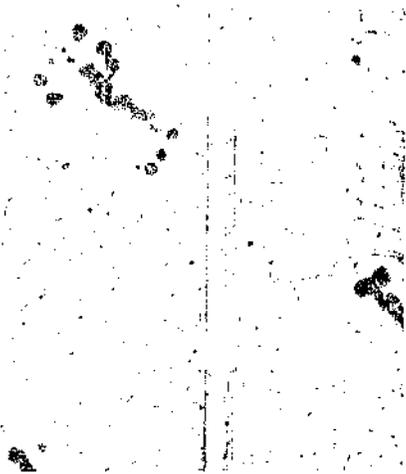
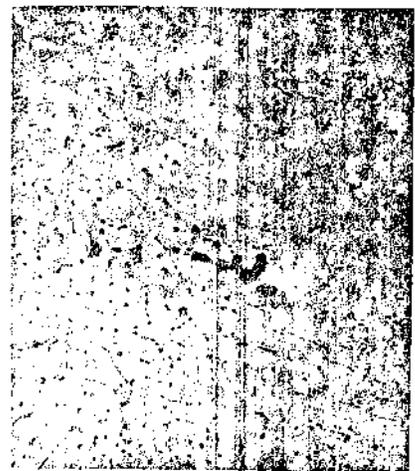


Fig. 4.17.- Microestruturas de A1 obtidas com diferentes condições do molde. Aumento 27 X.

dos gases e vapores no primeiro caso. A areia grossa apresenta condições de menor compactação, consequência do maior volume de espaços vazios inter-granulares, por sua vez, decorrentes da forma arredondada de seus grãos.

Esta melhor migração dos gases e vapores na areia grossa pode ser relacionada também com os menores tempos de solidificação observados, quando comparados nas mesmas condições de temperatura e umidade, aos obtidos com areia fina, uma vez que esta permeabilidade maior permite uma extração de calor que é processada mais rapidamente.

Observando as micrografias dos lingotes obtidos nas duas areias, para uma mesma temperatura de congelamento ( tanto  $-50$  como  $-110$   $^{\circ}\text{C}$  ), com o aumento da umidade é possível observar uma diminuição da quantidade de poros e um menor tamanho destes, como consequência do maior volume de vapor gerado ao conter mais água a mistura, o que faz carregar mais facilmente os eventuais gases gerados durante o vazamento.

Ainda pode-se observar, da análise dos tempos de solidificação do metal nos moldes congelados (tabela 4.5 (6)) que o aumento da umidade reduz o tempo total de solidificação, comprovando o efeito de maior taxa de resfriamento, pela ação de passagem de uma maior quantidade de vapor pelo líquido e liberação de maior volume vazio no interior da areia, pela evaporação da água.

## 5. ASPECTOS ECONÔMICOS DO PROCESSO

Uma discussão sobre os aspectos econômicos do processo de fundição utilizando moldes de areia congelada é de difícil abordagem, pela grande quantidade de variáveis que deveriam ser analisadas.

Pode-se pensar, por exemplo, no custo de matérias primas, instalações e equipamentos para moldagem, desmoldagem e recuperação de areias, além do aspecto da produtividade, para o qual deveriam ser analisados tempos envolvidos nas operações necessárias aos diferentes processos.

Quanto ao aspecto de custo de matérias primas, vantagens são apresentadas, em favor do processo de moldagem em areia congelada, tendo em vista a não utilização de aglomerantes e/ou aditivos de qualquer tipo, que representam grande parte dos custos da fundição nos processos convencionais. Deve-se ainda pensar aqui nos baixos índices de recuperação de areia contendo aglomerantes convencionais (argilas ou resinas) nos processos tradicionalmente utilizados. Para o caso da moldagem sem aditivos somente utilizando a água como aglomerante, a recuperação da areia pode ser considerada 100%, bastando sua secagem. Portanto a não utilização de complicados e onerosos processos de recuperação de areias para sua re-utilização, uma vez que, ao descongelar o molde, só torna-se necessário a secagem desta para posterior umidificação e re-utilização, é também determinada na avaliação dos custos.

Quanto ao aspecto da produtividade, vantagem apontam para o processo utilizando moldes congelados, uma vez observados o reduzido tempo para preparo das areias, seu congelamento e desmoldagem do fundido; além da facilidade de re-utilização da areia.

Apesar das aparentes vantagens do processo com moldes congelados, mostradas numa análise bastante geral e preliminar, o fator mais importante na avaliação da viabilidade

econômica do processo, é, sem dúvida, a do consumo do agente refrigerante, neste caso, o nitrogênio líquido. O cálculo desta consumo deverá variar para cada caso em particular, dependendo do tipo de metal a ser fundido, geometria dos moldes, temperaturas de congelamento das areias, grau de industrialização do processo, etc.

A. Pajak (30), mediante determinação da quantidade de calor que deve ser retirado da areia para abaixar sua temperatura para diversos teores de umidade, chega à conclusão que o processo é justificável economicamente ao ser comparado com custos gerais utilizados em processos convencionais.

Na fig. 5.1 pode ser observada a curva de consumo de nitrogênio proposta por Pajak para congelamento de um Kilo de areia, com determinado volumem, com diferentes umidades, e a diferentes temperaturas, muito embora, como dito anteriormente, o consumo dependerá para cada caso conforme diversas variáveis, tais como formas e dimensões dos moldes, temperaturas de congelamento necessarias, etc.

Tratando-se de processo ainda em estágio de viabilização prática, sua utilização em escala industrial depende, logicamente, de maiores estudos econômicos e mesmo técnicos que eliminem problemas inerentes a processos com pouca idade. Assim, pode-se somente dizer que, sem dúvida, o processo de fundição utilizando moldes congelados se mostra potencialmente interessante e que sua utilização em grande escala depende, somente, do tempo. Esta é a certeza que fica ao final deste trabalho.

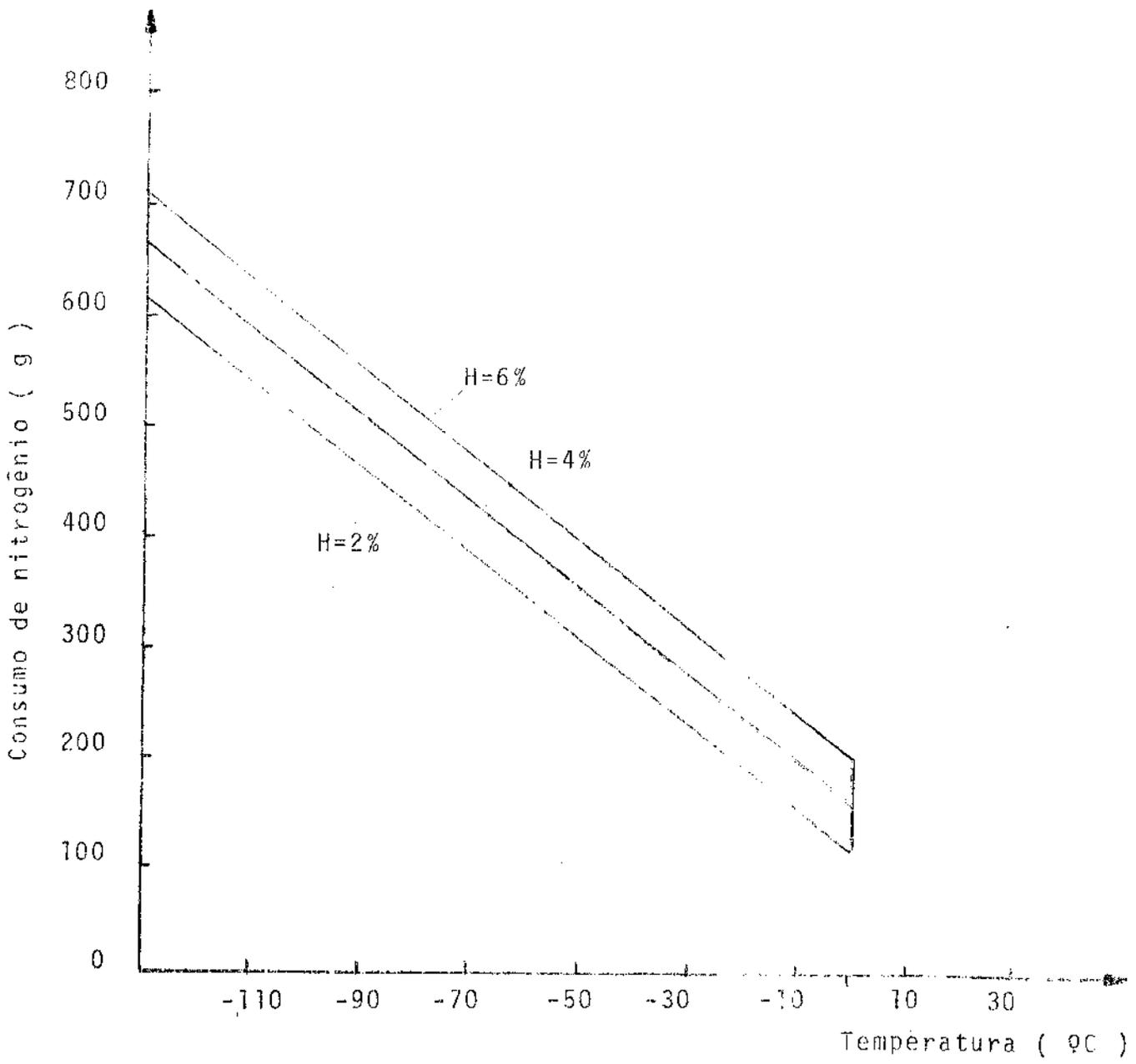


Fig. 5.1.- Consumo teóric de nitrogênio líquido para abaixar a temperatura de um kg de areia, conforme Pajak (30)

## CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

Para os sistemas analisados, pode-se concluir que:

### 1. QUANTO À VIABILIDADE DE CONFECÇÃO DOS MOLDES

- 1.a. A confeção de moldes de areia "aglomerados" somente com gelo mostrou-se facilmente exequível; envolvendo técnicas bastante simples.
- 1.b. O tempo de congelamento dos moldes mostrou-se independente da granulometria da areia, do teor de unidade e da temperatura de resfriamento.
- 1.c. O tempo de congelamento mostrou-se extremamente pequeno, em todos os casos: em torno de 7 minutos.
- 1.d. Após congelados, os moldes apresentaram alta rigidez e estabilidade dimensional.

### 2. QUANTO À VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO

- 2.a. Os moldes congelados apresentaram valores de limite de resistência à tração cerca de 50 a 300% superiores aos valores correspondentes em moldes de areia aglomerados com resina furânica.
- 2.b. O limite de resistência à tração de moldes congelados mostrou-se somente dependente do teor de água adicionado: maior o teor, maior a resistência. (até o valor de 6% investigado)
- 2.c. O tempo de descongelamento dos moldes ao ar, em todos os casos, variou de 25 a 35 min.

- 2.d. O tempo de descongelamento dos moldes ao ar mostrou-se levemente dependente do teor de água utilizado (menores tempos foram obtidos para o menor teor de água) e independente da granulometria da areia.
- 2.e. O tempo de descongelamento dos moldes contendo o metal líquido foi somente dependente da granulometria da areia (a areia 45-50, grossa, apresentou menor tempo de descongelamento).
- 2.f. O tempo de descongelamento dos moldes contendo líquido foi compatível com o tempo de solidificação do metal nele contido, para todos os casos.
- 2.g. O tempo de solidificação do Pb e Al nos moldes congelados foi, em todos os casos, cerca de 50% menor do que em moldes de areia aglomerados com resina furânica. Este tempo mostrou-se dependente do teor de água presente na areia (maior o teor, menor o tempo de solidificação) e do tipo de areia utilizado: na areia mais grossa o tempo é menor.

### 3. QUANTO À QUALIDADE DO FUNDIDO

- 3.a. Os lingotes obtidos apresentam em todos os casos bom acabamento superficial, até mesmo superiores aos obtidos com areias aglomeradas com resina.
- 3.b. A macroestrutura resultante mostrou-se dependente do tempo de solidificação do metal: para os tempos maiores, estruturas do tipo equiaxial grosseira, semelhante às obtidas em moldes de areia aglomerados com resina, foram as obtidas. Para os tempos inferiores foram obtidas estruturas colunares.

3.c. Foi determinado decréscimo na porosidade de lingotes obtidos em moldes congelados, com relação a moldes de areia.

#### 4. QUANTO À VIABILIDADE ECONÔMICA

4.a. O processo, ao não utilizar qualquer tipo de aglomerante, e, conseqüentemente, de não ser necessário o tratamento da areia para sua recuperação e reutilização, parece justificar economicamente a sua utilização.

4.b. O tipo e quantidade de agente refrigerante a ser usado dependerá das condições de fundição ( moldes, temperaturas, etc. ).

#### SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

- Influência do grau de compactação da areia nas características mecânicas do molde.
- Comportamento dos moldes congelados em sistemas fechados.
- Padronização dos testes de resistência mecânica, dureza, permeabilidade, etc.
- Outros meios refrigerantes.
- Viabilidade econômica do processo de congelamento de moldes vs outros processos convencionais.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- Siegel, M. " Curso de Fundição ". " Editora A.B.M. ", 7, 13-14, 1967.
- 2.- Sylvia, Gerin J. " Cast Metal Technology ", Pennsylvania State University, 55, 1972.
- 3.- Metalurgia, " Editora A.B.M. ", 30: 143, 1974.
- 4.- Igualador, A. " Moldeo com Autofraguantes ( El sistema Fenólico Uretano ) ". Revista Fundición ", España , 230, Diciembre 1979.
- 5.- Manual de Arenas de Fundición . " American Foundrymen Society".1967.
- 6.- Cibula, A. " Grain Control in Solidification Process " Inst. of Metals Conference of Grain Control. University of Sussex. March 1979.
- 7.- Taylor, Fleming and Wulff. " Foundry Engineering " . Massachusetts Inst. of Technology, 110. 1959.
- 8.- Flinn, A. " Fundamentals of Metal Casting ". University of Michigan, 33. 1963.
- 9.- Bradashia, C. " Fundição de Ligas Não Ferrosas ". " Editora A.B.M. ". 56. 1975.
- 10.- Henzel, F.R. " Trans. Aime ". 124. 300. 1937.
- 11.- Chalmers, B. " Principles of Solidification ". " John Wiley and Sons". 285. New York. 1964.
- 12.- Bowers, T.F. and Fleming, M.C. " Trans. Aime ". 239. 216. 1967.

- 13.- Biloni, H. and Morando, R. " Trans. Aime ". 242. 1121.  
1968.
- 14.- Prates, M. and Biloni, H. " Metallurgia A.B.M. " . 27.  
164. 1971.
- 15.- Ohno, A. " Trans. of the Iron and Steel Inst. of Japan ".  
10. 459. 1970.
- 16.- Walton, D. and Chalmers, B. " Trans. Aime ". 215. 871.  
Jun. 1959.
- 17.- Prates, M. e Davies, G. " Solidificação e Fundição de  
Metais e Suas Ligas. " Univ. de São Paulo." 1978.
- 18.- Davies, G. " Solidification and Casting ". "Applied  
Science Pub. " London. 1973.
- 19.- Robert, M.H." Tese de Doutorado ". " Unicamp. " 1983.
- 20.- Chalmers, B. " Journal of Australian Inst. of Metals"  
8. 3. 1963.
- 21.- Biloni, H. and Chalmers, B. "Journal of Mat. Science "  
3. 139. 1968.
- 22.- Winegard, W.C. and Chalmers, B. " Trans. Aime ". 46. 1214.  
1953.
- 23.- Jackson, K.A. " Canadian Journal of Physics ". 34. 473.  
Canada. 1956.
- 24.- Southin, R.T. " Trans. Aime. ". 239. 220. Fev. 1967.
- 25.- Ohno, A. The Solidification of Metals ". "Chijin Skodan  
Co." Japan. 1976.

- 26.- Ohno, A. and Motegi, T. and Soda, H. " Trans. of the Japan Iron and Steel Inst. " . 11. 18. Japan. 1971.
- 27.- Mondolfo, L.F. " Aluminium Alloys, Structure and Properties " . " Butterworths " . London. 1976.
- 28.- Cibula, A. and Ruddle, W. " Journal of the Inst. of Metals", 76.361. 1944-1950.
- 29.- Kita, K. et Al. " Characteristics of Frozen Molds". " Kawasaky Heavy Industries " . Tokyo. Aug. 1979.
- 30.- Pajak, A. " Frozen Mols: A New Generation of Foundry Molding Sands " . " British Foundryman " . 75.March. 1982.

A N E X O I

CÁLCULO DO TAMANHO DE GRÃO REAL DA AREIA 90-100

<u>Nº PENEIRA</u>	<u>RETENÇÃO</u>		<u>FATOR</u>	<u>PRODUTO</u>
	<u>GR</u>	<u>%</u>		
6	0	0	3	0
12	0	0	5	0
20	0	0	10	0
30	0	0	20	0
40	0	0	30	0
50	0	0	40	0
70	2.8	5.6	50	280
100	26.4	52.8	70	3304
140	48.0	96.0	100	4320
200	49.7	99.4	140	476
270	49.8	99.6	200	40
FUNDO	50.0	100.0	300	<u>120</u>

$$\text{TAMANHO GRÃO A.F.S.} = \frac{\text{SOMA DOS PRODUTOS}}{\% \text{ DE RETENÇÃO}}$$

TAMANHO DE GRÃO A.F.S. ENCONTRADO: 85.4