

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DOS
MATERIAIS - PPGEMM

ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS DE VAZAMENTO
CONVENCIONAL E CONTRA GRAVIDADE PARA O
PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO, USANDO A
LIGA DE ALUMÍNIO 356

POR

INÁCIO DA FONTOURA LIMBERGER
ENGENHEIRO MECÂNICO

TRABALHO REALIZADO NO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA
DA ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFRGS, DENTRO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DOS MATERIAIS - PPGEMM

PORTO ALEGRE
1 9 9 3

ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS DE VAZAMENTO CONVENCIONAL E CONTRA GRAVIDADE PARA O PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO, USANDO A LIGA DE ALUMÍNIO 356

D I S S E R T A Ç Ã O

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DOS MATERIAIS - PPGEMM, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: METALURGIA DE TRANSFORMAÇÃO

POR

INÁCIO DA FONTOURA LIMBERGER
ENGENHEIRO MECÂNICO

1 9 9 3

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração Metalurgia de Transformação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Banca Examinadora:

Prof. Aleir Antônio Fontana de Paris

Doutor em Engenharia

CT - UFSM.

Prof. Marlos Dias Diehl

Doutor em Engenharia

PPGEMM - UFRGS

Prof. Arno Müller (Orientador)

Doutor em Engenharia

PPGEMM - UFRGS.

Coordenador do PPGEMM

Carlos Hoffmann Sampaio

Doutor em Engenharia

A G R A D E C I M E N T O S

- Ao Prof. Dr. Arno Müller, pela orientação e apoio concedidos durante a execução deste trabalho.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e À Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP) pelas bolsas de estudos fornecidas.
- Aos professores, funcionários e colegas do DEMET-PPGEMM pela colaboração prestada durante a execução deste trabalho.
- Aos funcionários da Biblioteca da Escola de Engenharia da UFRGS, pelo atendimento.
- Ao Engenheiro Neverton H. Peixoto pela colaboração durante a realização dos experimentos.
- À Viação Aérea Riograndense (VARIG) pela execução dos tratamentos térmicos de forma gratuita.
- À ALCOA pela doação do alumínio necessário à realização dos experimentos.
- À NUCLEMON pela doação do material refratário usado nas lamas durante a realização dos experimentos.
- Ao Laboratório de Máquinas Ferramentas da Universidade Federal de Santa Maria pela execução da usinagem dos corpos de prova de forma gratuita.
- Aos meus pais pelo apoio e incentivo dado durante todo este período.
- À minha mulher pela compreensão, apoio e estímulo.

S U M Á R I O

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	XVIII
RESUMO	XX
ABSTRACT	XXII
1 - INTRODUÇÃO	23
2 - PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO	25
2.1 - Revisão bibliográfica	25
2.1.1 - Histórico	25
2.1.2 - Definição e descrição do processo	29
2.1.3 - Vantagens e campo de aplicação	33
2.1.4 - Regras básicas para projeto de peças	35
2.1.5 - Matrizes para modelos	41
2.1.6 - Materiais para modelos	46
2.1.6.1 - Ceras	46
2.1.6.2 - Plásticos	49
2.1.6.3 - Mercúrio congelado	50
2.1.7 - Montagem de cachos	51
2.1.8 - Revestimento cerâmico	54
2.1.8.1 - Materiais refratários e ligantes	55
2.1.8.2 - Moldes sólidos	60
2.1.8.3 - Molde casca	61

2.1.8.4 - Confeção e controle da lama	62
2.1.8.5 - Cascas cerâmicas e suas propriedades	67
2.1.8.6 - Remoção dos modelos (Desceramentos)	70
2.1.8.7 - Sinterização	74
2.2 - Método de fusão e vazamento de metais usados em fundição de precisão	77
2.2.1 - Métodos de fusão	77
2.2.2 - Métodos de vazamento de metais na fundição de precisão	78
2.2.2.1 - Métodos de vazamento onde o preenchimento do molde é feito apenas pela ação da pressão metalostática.	80
2.2.2.2 - Método de vazamento com atuação de forças adicionais	84
2.3 - Metais e ligas usadas em fundição de precisão	97
2.3.1 - Alumínio e suas ligas	100
2.3.1.1 - Ligas de alumínio silício	104
2.3.1.1.1 - Liga 356	106
2.4 - Tratamento térmico do alumínio e suas ligas	111
2.4.1 - Alívio de tensões e estabilização	112
2.4.2 - Recozimento para recristalização e ou homogeneização	112
2.4.3 - Solubilização	113
2.4.4 - Precipitação ou envelhecimento	114
2.4.5 - Mecanismo de endurecimento	115
2.4.6 - Identificação dos tratamentos térmicos	119
3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL	121
3.1 - Equipamentos usados	121
3.2 - Realização dos suprimentos	122
3.2.1 - Preparação dos modelos de cera	126
3.2.2 - Preparação das lamas	129
3.2.3 - Obtenção dos moldes cerâmicos	133

3.2.4 - Processos de vazamento	137
3.2.4.1 - Processos de vazamento convencional	137
3.2.4.2 - Processo de vazamento contra gravidade à baixa pressão	139
3.2.5 - Tratamento térmico	142
3.2.6 - Usinagem dos corpos de prova	145
3.2.7 - Ensaio de tração	147
3.2.8 - Ensaio de dureza	148
3.2.9 - Determinação da densidade	149
3.2.10 - Preparação dos corpos de prova para as análises metalográficas	150
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	154
4.1 - Considerações sobre os processos de enchimento de mol- des	154
4.2 - Análise dos ensaios de tração	161
4.3 - Resultados obtidos na determinação da densidade	168
4.4 - Avaliação qualitativa do nível de porosidade nos corpos de prova	172
4.5 - Resultados dos testes de dureza	175
4.6 - Micrográfica dos corpos de prova	179
5 - CONCLUSÃO	183
6 - SUGESTÃO PARA NOVOS TRABALHOS	185
7 - BIBLIOGRAFIA	186
8 - APÊNDICE	191

LISTA DE FIGURAS

- Figura 01 - Ferramenta em bronze e seu molde cerâmico que foram feitos por volta de 4.000 A.C. Este tipo de peça serviu como base para que, mais tarde, pudessem ser feitos objetos mais complexos³.. 25
- Figura 02 - Caixa em bronze feita pelo processo de fundição de precisão durante a Dinastia Shang, que possui uma riqueza em detalhes filigranados e paredes de espessura reduzida⁴ 26
- Figura 03 - Escultura fundida em bronze, feita pelo processo de fundição de precisão, aproximadamente no VII século A.C. por escultores egípcios, na qual notam-se os canais de alimentação e respiro, localizados na parte inferior da base². 27
- Figura 04 - Esquema gráfico de todas as etapas envolvidas no processo de fundição de precisão 32
- Figura 05 - Aparecem da esquerda para a direita: um dedo humano, um modelo de cera deste dedo e um dedo fundido em liga 356 de alumínio, onde se nota a boa copiabilidade que o processo de fundição de precisão pode fornecer 33
- Figura 06 - Exemplo de peça feita por fundição de precisão na qual é visível a complexidade de sua geome-

- tria e também sua baixa usinabilidade, pois a mesma é feita numa liga à base de Cr, Ni, Mo, Nb.¹⁵ 37
- Figura 07 - Em 'B', vê-se uma peça estampada, furada, cortada, doorada, rebitada e calibrada, e em 'C', uma peça feita por fundição de precisão, para executar a mesma função, onde foi feito um novo projeto visando a melhor adaptação ao equipamento e aumentar a vida útil da peça bem como a rigidez e o acabamento superficial..... 39
- Figura 08 - Matriz metálica feita em várias partes para possibilitar a retirada do modelo de cera, devido à complexidade da forma e da espessura das pás do rotor⁴ 45
- Figura 09 - Seqüência para a obtenção de um modelo de cera com macho solúvel. Da direita para a esquerda tem-se uma matriz para a injeção do macho solúvel, ao lado uma matriz para a injeção do modelo em cera com local para posicionamento do macho e bem à esquerda, um modelo em cera com macho e outra, após a retirada do mesmo⁴ 45
- Figura 10 - Desenho de um copo Zahn com suas medidas padrões¹⁰ 63
- Fig. 11 A - Sinterização vítrea. Um silicato vítreo (negro) se forma quando o material é aquecido acima de linha de 'solidus'. O vidro não se cristaliza durante o resfriamento mas forma uma forte ligação entre as partículas³¹ 75

- Fig. 11 B - Sinterização sólida. (a) As partículas antes da sinterização possuem duas superfícies adjacentes. (b) Os grãos após a sinterização possuem um contorno. A força motora da sinterização é a redução da área superficial e portanto da energia superficial³¹ 76
- Figura 12 - Esquema de como funciona o vazamento com forno de inversão, dando atenção para o fato do enchimento ocorrer primeiramente de um lado e depois do outro e do sentido do enchimento das peças de um lado ser contrário ao do outro lado¹⁰ 82
- Figura 13 - Desenho esquemático de como funciona o sistema de vazamento utilizando a força centrífuga para melhorar o enchimento das peças⁴ 87
- Figura 14 - Desenho comparativo de como se dá o enchimento de cachos, usando três tipos de vazamento. Da esquerda para a direita: vazamento convencional ao ar, vazamento contra gravidade utilizando baixa pressão sobre o banho e vazamento contra gravidade usando vácuo³⁴ 98
- Figura 15 - Gráfico do aumento da solubilidade do hidrogênio no alumínio em função da temperatura⁹ 101
- Figura 16 - Gráficos que mostram as melhorias nas propriedades mecânicas, devido ao tratamento de modificação por sódio e também os efeitos sobre o diagrama de fases motivado pela adição de sódio nas ligas alumínio-silício⁴⁰ 103

Figura 17 - Gráfico mostra os efeitos provocados sobre a resistência à tração e ao alongamento pela contaminação de ferro em ligas de alumínio 356 ⁴⁵	110
Figura 18 - Esquema que mostra como ocorre a deformação em ligas de alumínio seguindo planos diagonais preferenciais ⁹	116
Figura 19 - Esquema gráfico do funcionamento do quadro do controle usado para o ar comprimido	122
Figura 20 - Desenho do tarugo fundido para a obtenção dos corpos de prova e o desenho da usinagem dos mesmos	125
Figura 21 - Tubos de P.V.C. usados como moldes para a obtenção dos modelos em cera dos tarugos dos corpos de prova e do canal principal	128
Figura 22 - Matriz em Durepoxi usada para a obtenção dos modelos em cera dos canais de ataque	128
Figura 23 - Ferramentas criadas para facilitar a montagem dos cachos de cera e dar bom acabamento das uniões	129
Figura 24 - Moldes cerâmicos usados no método de vazamento contra gravidade, sendo que o do centro já está pronto com o cone cerâmico e o canal principal selado	136
Figura 25 - Desenho esquemático do equipamento usado para a realização do vazamento contra gravidade usando baixa pressão	141

Figura 26 - Equipamento usado para o vazamento contra gravidade, composto de quadro de controle para o ar comprimido, forno para fusão, tampa de vedação e câmara de proteção	143
Figura 27 - Câmara de proteção, mostrando a posição do cacho e a mola de sujeição do mesmo	143
Figura 28 - Esquema gráfico do ciclo de tratamento térmico T6 usado nos experimentos	145
Figura 29 - Corpos de prova usinados e devidamente identificados	147
Figura 30 - Embutimento feito com cera para poder polir o o maior número de corpos de prova ao mesmo tempo	152
Figura 31 - Cachos obtidos pelo método de vazamento contra gravidade, usando o metal a 650°C e o molde a 200°C, onde foi usado 1Kgf/cm ² e o cacho da esquerda e 2Kgf/cm ² para o cacho da direita	155
Figura 32 - Cachos obtidos pelo método de vazamento contra gravidade usando o metal a 650°C e o molde a 300°C, onde o cacho da direita teve seu enchimento completo usando a pressão de 2Kgf/cm ² e no cacho da esquerda a pressão usada foi 1Kgf/cm ²	156
Figura 33 - Esquema gráfico usado para demonstrar as formas de expulsão do ar para os dois métodos de vazamentos usados	160
Figura 34 - Gráficos dos valores obtidos nos ensaios de tra-	

- ção para a tensão de ruptura com relação à temperatura de vazamento do metal, para os três processos de vazamento. Nestes experimentos, os moldes foram pré-aquecidos a 200°C e os corpos de prova estão no estado T6 163
- Figura 35 - Gráfico dos valores obtidos nos ensaios de tração para a tensão de ruptura com relação à temperatura de vazamento do metal, para os três processos de vazamento. Nestes experimentos, os moldes foram pré-aquecidos a 300°C e os corpos de prova estão no estado T6 165
- Figura 36 - Gráfico de barras feito para a temperatura de vazamento de 700°C onde se compara o desempenho dos processos usados e a temperatura dos moldes. 167
- Figura 37 - Corpos de prova rompidos, onde se nota a fratura do tipo plana e sem extricção, característica dos materiais frágeis 168
- Figura 38 - Gráfico da densidade para os corpos de prova a partir de moldes aquecidos a 200°C , onde variaram as temperaturas e os processos de vazamento, comparados ao valor térmico, após o tratamento térmico T6 169
- Figura 39 - Gráfico da densidade para os corpos de prova obtidos a partir de moldes aquecidos a 300°C , onde variaram as temperaturas e os processos de vazamento, comparados ao valor teórico, após o tratamento térmico T6 170

- Figura 40 - Fotos tiradas para análise do nível de porosidade nos corpos de prova obtidos com os moldes aquecidos a 200°C , onde se pode ver o maior ou menor número de poros, conforme os processos de vazamento e a temperatura de vazamento usada para o metal. Aumento 4,5 vezes 174
- Figura 41 - Fotos tiradas para análise do nível de porosidade nos corpos de prova obtidos com os moldes aquecidos a 300°C , onde se pode ver o maior ou menor número de poros, conforme os processos de vazamento e a temperatura do vazamento usada para o metal. Aumento 4,5 vezes 176
- Figura 42 - Gráfico obtido a partir dos resultados dos ensaios de dureza Brinell, onde se relaciona a dureza com a temperatura de vazamento do metal, para os três processos de vazamento, usando-se moldes pré-aquecidos a 200°C . Resultados após o tratamento térmico T6 177
- Figura 43 - Gráfico obtido a partir dos resultados dos ensaios de dureza Brinell, onde se relaciona a dureza com a temperatura de vazamento do metal, para os três processos de vazamento, usando-se moldes pré-aquecidos a 300°C . Resultados após o tratamento térmico T6 179
- Figura 44 - Microestrutura da liga 356 bruta de fusão onde se pode ver a matriz de alumínio mais clara e o silício mais escuro em forma de agulhas. Corpos de prova sem ataque. Aumento 150 vezes. 180

- Figura 45 - Microestrutura da liga 356 no estado T6, onde se pode ver a matriz de alumínio mais clara e o silício mais escuro, todo fragmentado e globulizado no contorno de grão. Corpo de prova sem ataque. Aumento 150 vezes 180
- Figura 46 - Seqüência de fotos onde foi variada a temperatura de vazamento do metal e pode-se ver a melhor eficiência do tratamento térmico nas temperaturas de vazamento mais baixas. Corpos de prova sem ataque e aumento de 150 vezes. 182
- Figura 47 - Gráfico da tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 200°C. Obtidos pelo processo convencional de vazamento 192
- Figura 48 - Gráfico da tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 300°C. Obtidos pelo processo convencional de vazamento 193
- Figura 49 - Gráfico da tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 200°C. Obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade usando 1Kgf/cm² como pressão 194
- Figura 50 - Gráfico da tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 300°C. Obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade usan-

do 1Kgf/cm ² como pressão	195
Figura 51 - Gráfico da tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal para moldes aquecidos a 200 ^o C. Obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade usando 2Kgf/cm ² como pressão	196
Figura 52 - Gráfico da tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal para moldes aquecidos a 300 ^o C. Obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade usando 2Kgf/cm ² como pressão	197
Figura 53 - Gráfico da densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, quando são usados moldes a 200 ^o C. Obtidos pelo processo convencional de vazamento	199
Figura 54 - Gráfico da densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 300 ^o C. Obtidos pelo processo convencional de vazamento	199
Figura 55 - Gráfico da densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 200 ^o C. Obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade, usando 1Kgf/cm ² como pressão	200
Figura 56 - Gráfico da densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 300 ^o C. Obtidos pelo	

processo de vazamento contra gravidade. usando 1Kgf/cm ² como pressão	200
Figura 57 - Gráfico da densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, pa- ra moldes aquecidos a 200 ^o C obtidos pelo pro- cesso de vazamento contra gravidade, usando 2Kgf/cm ² como pressão	201
Figura 58 - Gráfico da densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, pa- ra moldes aquecidos a 300 ^o C obtidos pelo pro- cesso de vazamento contra gravidade, usando 2Kgf/cm ² como pressão	201
Figura 59 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 200 ^o C, obtidos pelo pro- cesso convencional de vazamento	203
Figura 60 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 300 ^o C, obtidos pelo pro- cesso convencional de vazamento	203
Figura 61 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 200 ^o C, obtidos pelo pro- cesso de vazamento contra gravidade, usando 1Kgf/cm ² como pressão	204
Figura 62 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal,	

- para os moldes aquecidos a 300°C , obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade, usando $1\text{Kgf}/\text{cm}^2$ como pressão 204
- Figura 63 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para os moldes aquecidos a 200°C , obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade, usando $2\text{Kgf}/\text{cm}^2$ como pressão 205
- Figura 64 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para os moldes aquecidos a 300°C , obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade, usando $2\text{Kgf}/\text{cm}^2$ como pressão 205

LISTA DAS TABELAS

Tabela I	- Fornece a relação entre o diâmetro do furo ou a largura da ranhura e sua profundidade, quando não são usados machos ¹	40
Tabela II	- Relaciona prováveis defeitos nas peças fundidas com possíveis erros na montagem dos cachos ¹⁰	53
Tabela III	- Relaciona o tempo obtido nos testes com copo ZANH e seu valor em POISE ¹⁰	64
Tabela IV	- Relação dos tipos de vazamentos usados em fundição de precisão e sua atmosfera de vazamento	79
Tabela V	- Relação existente entre as propriedades mecânicas obtidas pelo processo 'CLA' e o convencional para diversas ligas ³⁴	90
Tabela VI	- Componentes encontrados na liga 356 e suas variações permitidas ⁹	106
Tabela VII	- Valores para as propriedades mecânicas da liga 356 quando tratada termicamente ⁴⁶	108
Tabela VIII	- Alguns sistemas de endurecimento por precipitação ⁵³	119

Tabela	IX - Mostra os valores das temperaturas usadas nos experimentos para os moldes cerâmicos e para o metal, referente aos três processos de vazamento	123
Tabela	X - Tabela contendo todos os valores obtidos por ensaios de tração onde são apresentados os valores da força de ruptura, diâmetro do corpo de prova e a tensão da ruptura	198
Tabela	XI - Tabela com os valores obtidos nos testes para avaliação da densidade dos corpos de prova ..	202
Tabela	XII - Tabela contendo todos os valores obtidos nos ensaios de dureza Brinell nos corpos de prova	206
Tabela	XIII - Tabela dos valores obtidos nos ensaios de permeabilidade feitos nos corpos de prova com as mesmas características das cascas cerâmicas usadas	207

R E S U M O

Em síntese, este trabalho consta da comparação feita entre os métodos de vazamento convencional do processo de fundição de precisão com o método de vazamento contra gravidade, aplicado ao mesmo processo de fundição.

No método de vazamento contra gravidade foi intejado ar comprimido como elemento pressurizador e foi usado um forno de fusão hermético.

O metal usado nos experimentos foi a liga de alumínio, denominada 356, que possui o silício e o magnésio como elementos de adição.

Para comparação dos métodos foram fundidos três grupos distintos de corpos de prova. Um pelo método convencional e os outros dois pelo método contra gravidade, sendo que, para estes foram usadas duas pressões, uma de 1Kgf/cm^2 e outra de 2Kgf/cm^2 .

Para cada um destes grupos foram usadas temperaturas de 200°C e 300°C para os moldes. Foi feita ainda uma variação para a temperatura de vazamento da liga, que foi estipulada em 650, 700, 750 e 800°C .

Após a obtenção dos corpos de prova, estes foram submetidos a uma bateria de testes que incluiu resistência à tração, dureza Brinell, densidade, nível de porosidade e avaliação do

processo de enchimento dos moldes, que forneceram subsídios para a avaliação da eficiência de cada método.

Comparando-se os resultados dos testes, pode-se concluir que o método de vazamento contra gravidade teve um melhor "desempenho" quando comparado com os resultados do método convencional.

A B S T R A C T

This work consists in a comparison between the conventional pouring method, with the counter gravity pouring method, for the investment casting process.

In the counter gravity method compressed air was used as the pressurized element and a hermetic melting furnace. The metal was the aluminum alloy 356, with silicon and magnesium as the additive element.

Three different test specimen groups were melted: one by the conventional method and the others by the counter gravity method, using pressure of 1kgf/cm^2 and 2kgf/cm^2 . Mould pouring temperature of 200 and 300°C in 650, 700, 750 and 800°C were used.

The test specimen were submitted to tensile strength Brinell hardness, density, porosity level tests and the moulds filling process valuation.

Comparing the results, it was concluded that the counter gravity pouring method presented a better performance than the conventional method.

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

1 - INTRODUÇÃO

Durante muitos anos houve a necessidade do desenvolvimento de um método de fundição de precisão que aumentasse ainda mais a qualidade final dos produtos, fundidos por este método.

Dentre as tentativas feitas por diversos pesquisadores, existe o método de vazamento contra gravidade com a utilização de uma câmara de vácuo.

A aplicação de pressão durante o vazamento e solidificação deveria trazer vantagens quanto à suavidade do enchimento, quanto ao acabamento superficial, quanto à melhoria das propriedades mecânicas e sanidade das peças.

Chandley e Lamb patentearam o método desde 1973⁽³⁴⁾ tendo sido os únicos que fizeram publicações a respeito desta técnica. Tendo em vista a falta de informações disponíveis na literatura, decidiu-se fazer uma série de experimentos, variando temperatura de vazamento, temperatura de molde e usando pressão de gases sobre o banho para fazer o metal preencher o molde em lugar de usar a câmara de vácuo hermética para compor um trabalho que se transformou no corpo da presente Dissertação de Mestrado.

Tendo o Rio Grande do Sul cinco das oito maiores empresas de fundição de precisão existentes no país, o Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com seu Departamento de Microfusão, possui grande importância no contexto

nacional. Além dos trabalhos publicados a respeito do assunto e das pesquisas feitas para o desenvolvimento de peças em liga de alumínio para a Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER), este trabalho procura contribuir para ampliar os conhecimentos a respeito do novo processo e aumentar as possibilidades de interação entre a Universidade e a indústria, criando alternativas para a melhoria dos processos produtivos.

2 - O PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

2.1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 - HISTÓRICO

Não se sabe, exatamente, quando o homem pôs em prática pela primeira vez o processo de fundição, utilizando modelos consumíveis. Existem evidências que o processo apareceu antes da era Cristã, visto que as peças mais antigas conhecidas provêm da Ásia Menor e têm aproximadamente 6000 anos. (2) (3)

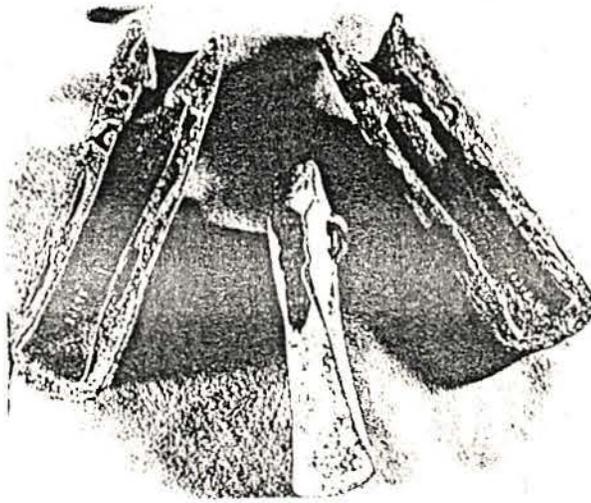


Fig. 01 - Ferramenta em bronze e seu molde cerâmico que foram feitos por volta de 4000 A.C. Este tipo de peça serviu como base, para que, mais tarde, pudessem ser feitos objetos mais complexos (3)

Objetos encontrados em escavações de civilizações egípcias e chinesas, que são ricos em detalhes, possuindo paredes finas e delicados detalhes filigranados, tornam evidente o fato dos mesmos terem sido esculpidos em cera e estes serem usados, posteriormente, como modelo para o processo de fundição.

Como exemplos destes objetos, tem-se, na figura 2, uma caixa de bronze feita por artesãos da Dinastia Shang (1766-1122 A.C.) e na figura 3 uma estatueta egípcia, também fundida em bronze, feita aproximadamente no século VII A.C.:

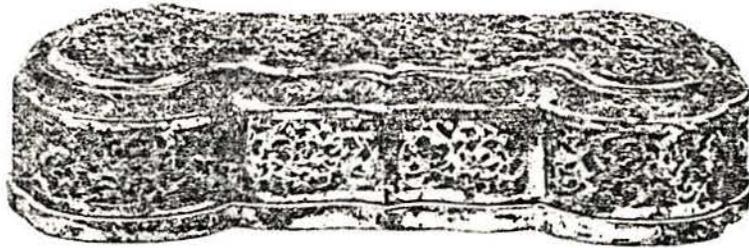


Fig.02 - Caixa em bronze feita pelo processo de fundição de precisão durante a Dinastia Shang, que possui uma riqueza em detalhes filigranados e paredes de espessura reduzida⁽⁴⁾

Na caixa chinesa é visível a riqueza de detalhes filigranados bem como a existência de paredes de espessura bem reduzida.

A estatueta desperta um interesse especial porque cons-



Fig.3 - Escultura fundida em bronze feita pelo processo de fundição de precisão, no século VII A.C., aproximadamente, por escultores egípcios, no qual notam-se os canais de alimentação e respiro localizados na parte inferior da base⁽²⁾

titui um exemplo das primeiras fabricações de peças em série. O modelo de cera que deu origem à estatueta em metal, foi montada a partir de dois outros modelos feitos separadamente, um para a cabeça e outro para o tronco, usando coquilhas de gesso.

Esta técnica era usada pelos artesãos egípcios, que possuíam um grande número de coquilhas e com as quais podiam fazer uma série de estatuetas, cada uma diferente da outra. Outro detalhe a ser observado é a presença de dois canais, um de alimentação e outro de saída de gases, situados abaixo do pedestal, o que caracteriza a evolução técnica do processo.⁽²⁾

Os historiadores perdem a pista deste processo na Europa

e Ásia até o século XVI. Porém, nessa época surgiram peças fundidas pelo processo de cera perdida, em vários locais do globo terrestre, tais como em tribos da África, em Quimbaia no Vale do Cauca na Colômbia^{(5) (6)} e no México, respectivamente, peças estas que foram feitas antes do descobrimento da América.

As técnicas usadas pelos fundidores astecas eram as mesmas utilizadas pelos fundidores de Quimbaia, porém, com alguns requintes a mais.

O processo volta a ser empregado, na Europa, pelo famoso fundidor e escultor Benvenuto Cellini que aprendeu o processo a partir de textos escritos pelo monge Thophilus Presbyter, que vêm a ser os primeiros escritos sobre esta técnica. Esse texto era intitulado *Schedula Diversarum Artium* e data do ano 1100.^{(5) (6)}

Em 1538, Vannoccio Biringuccio, chefe da fundição papal, descreve em detalhes o processo de fundição por cera perdida, em seu livro *Pirotechnia*⁽⁶⁾ e inúmeras obras são feitas neste período. As que mais se destacaram foram a estátua de "Perseu e a cabeça de Medusa (1540)^{(1) (2) (4) (5) (7)}, feitas pelo italiano Benvenuto Cellini e a estátua equestre "O grande eleitor" (1700), feita pelo alemão Andrea Schlütter.

O processo de cera perdida volta a cair no esquecimento pelos escultores. Em 1897, o dentista americano B.F. Phibook, de Iowa^{(1) (4) (5)} redescobre a técnica e a aplica em próteses dentárias de ouro. A metodologia e os princípios utilizados, por Phibook, vieram constituir os fundamentos para a aplicação do processo a nível industrial. Nessa época, a indústria não despertou para o potencial técnico do processo e a utilização só entrou realmente para as indústrias com o advento da segunda guerra mun-

dial. A urgente demanda da indústria bélica sobrecarregou a indústria de máquinas e ferramentas e o processo de cera perdida foi a resposta encontrada para a produção de centenas de peças complexas, com bom acabamento superficial e boa precisão dimensional, necessárias para as indústrias de armamentos e aeronaves. Destacam-se entre essas peças as palhetas para turbinas, usadas em motores a jato, que estavam sendo desenvolvidos. As palhetas foram projetadas para trabalhar em altas temperaturas e sofrendo grandes esforços; para isso eram necessárias ligas de alta resistência mecânica que tinham baixa usinabilidade, o que veio reforçar o uso do processo. A partir deste momento, o mesmo passou a ser atraente do ponto de vista técnico e econômico, passando, assim, a ser usado como mais uma alternativa na produção de peças.

Atualmente, a fundição por cera perdida é um processo industrial que possui rígidos e refinados controles, em cada etapa do processo de fabricação e se utiliza de laboratórios bem montados e equipados para dar suporte à produção, obtendo-se, assim, peças com grande confiabilidade e alta qualidade.

2.1.2 - DEFINIÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Este processo pode ser identificado por várias denominações diferentes, dentro da bibliografia específica sobre o assunto, entre os quais:

- Na língua portuguesa:

Fundição de precisão por cera perdida

Microfusão

Fundição de precisão

Fundição a cera perdida

Fundição por modelo consumível

- Na língua inglesa:

Investment casting

Lost wax process

- Na língua espanhola:

Microfusion

Microfundicion

- Na língua francesa:

Moulage à cire perdue

Modèle perdu

Moulage de précision

- Na língua alemã:

Präzisiongussverfahren

Modell-oder Wachsaushmelzverfahren

Feinguss

No decorrer do trabalho usar-se-á, unicamente, a denominação Fundição de Precisão, para identificar o processo.

De forma conceitual, este é o processo de fundição no qual se utiliza um modelo feito de material consumível (fusível), que é, posteriormente, revestido por um material cerâmico refratário. O modelo é então eliminado, obtendo-se assim um molde cerâmico oco, onde mais tarde será vazado o metal líquido, dando origem a peças com boa qualidade dimensional e bom acabamento superficial,

Os trabalhos para a fabricação pelo processo de fundição de precisão se iniciam com o projeto da peça, levando-se em conta o metal de que esta será feita e de algumas regras básicas

inerentes ao mesmo.

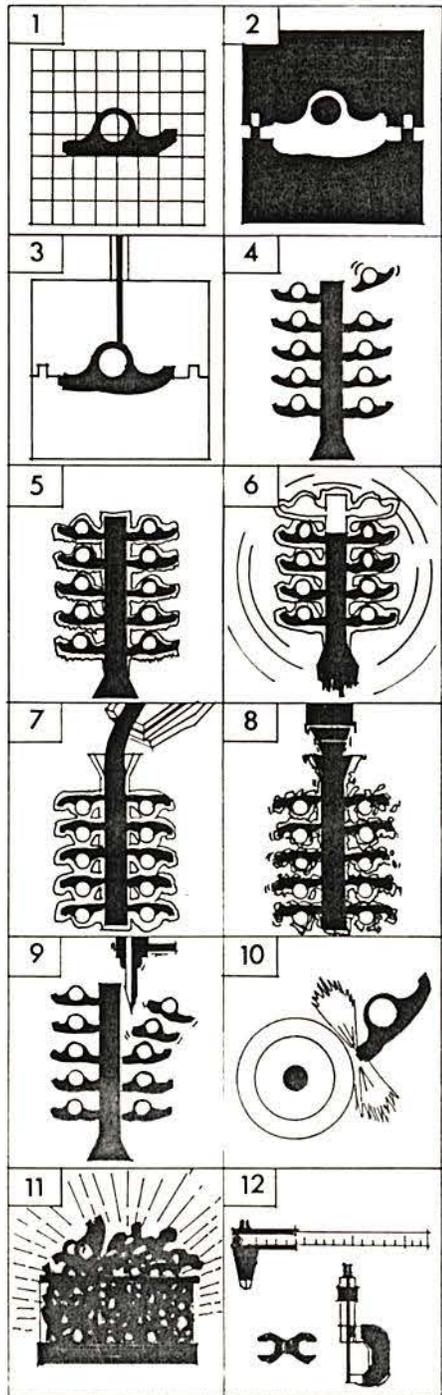
O segundo passo é o projeto da matriz que irá produzir os modelos de cera. A cavidade da matriz deverá possuir uma sobremedida de forma a compensar a contração do material do modelo, do molde cerâmico e também do metal que será vazado.

O terceiro passo é a montagem dos cachos formados pelos modelos injetados fixados em torno de uma haste, também de material consumível (uma peculiaridade desse processo é o fato de ser necessário um modelo consumível para cada peça que se deseja obter em metal). A quantidade de modelos colocados em cada cacho varia consideravelmente, podendo ser formado por um único ou até mesmo possuir uma centena deles, dependendo do tamanho da peça e do metal a ser vazado.

A etapa seguinte consiste em mergulhar o cacho em uma lama cerâmica refratária e deixar escorrer o excesso. Em seguida, sobre esta lama, ainda úmida, aplica-se um material cerâmico refratário seco e granulado que a ele ficará aderido (estucagem). Esta operação é repetida até que se forma uma camada espessa, que seja suficientemente forte para resistir à desceragem e ao posterior vazamento do metal. Completa esta fase, deixa-se o cacho em um local com temperatura e umidade controladas até que fique completamente seco. A desceragem é a próxima operação e é feita para remover o material de modelo, do interior do molde cerâmico.

O molde, já livre do modelo, é levado a uma estufa de calcinação onde permanece a uma temperatura elevada, durante certo período de tempo, para que ocorra a sinterização e esse adquira resistência e permeabilidade suficientes para receber o metal líquido.

O vazamento do metal é feito com o molde ainda quente. Espera-se a completa solidificação do metal e o resfriamento que possibilite o manuseio e procede-se, então, a retirada do material cerâmico.



- 1 - Projeto da peça
- 2 - Produção da matriz
- 3 - Injeção da cera
- 4 - Montagem dos cachos
- 5 - Produção da casca cerâmica
- 6 - Desceragem e sinterização dos moldes
- 7 - Vazamento do metal
- 8 - Desmoldagem
- 9 - Separação das peças
- 10 - Acabamento
- 11 - Tratamento térmico
- 12 - Controle de qualidade

Fig. 04 - Esquema gráfico de todas as etapas envolvidas no processo de fundição de precisão

Posteriormente, as peças são separadas da haste por meio

de corte e são encaminhadas às próximas operações, que podem ser: limpeza, acabamento, tratamento térmico, controle de qualidade e outras, dependendo da utilização futura da peça. (Fig. 04)

2.1.3 - VANTAGENS E CAMPO DE APLICAÇÃO

O processo da fundição, atualmente, é empregado em quase todos os campos da engenharia. A sua versatilidade está ligada à sua capacidade de produzir peças com grande precisão dimensional, com um bom acabamento superficial e grande aptidão em copiar detalhes.

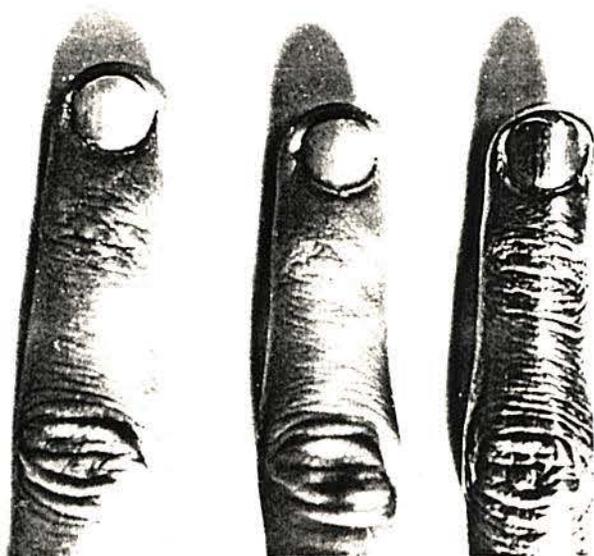


Fig. 05 - Aparecem da esquerda para a direita: um dedo humano, um modelo de cera deste dedo e um dedo fundido em liga 356 de alumínio, onde se nota a boa copiabilidade que o processo de fundição de precisão pode fornecer

Estas características possibilitam uma maior flexibilidade no projeto de peças, permitindo aos projetistas criarem formas mais complexas e funcionais, valendo-se de detalhes internos e externos. Possibilita, ainda, a utilização de ligas metálicas

de alta resistência, pois evita as operações de usinagem posteriores. Em alguns casos a sobreposição destes fatores tornam a fundição de precisão o único processo viável de fabricação de peças. Assim, por exemplo:

- Geometria - Complexidade na forma externa ou interna, contra saída, protuberâncias ou reentrâncias em planos diferentes, perfis reversos, etc.
- Qualidade superficial - Boa aparência, ótimo acabamento superficial, fiel reprodução de detalhes. (Fig. 05)
- Ligas metálicas - Permite a utilização da grande maioria das ligas conhecidas.
- Limitações de projetos - Redução de peso em peças estruturais e de transmissão, alterações de forma, transformação de conjuntos de peças numa única peça.

Os grandes consumidores de peças obtidas pela fundição de precisão são as indústrias aeronáuticas, automobilísticas e armamentos, mas podem-se citar outras que utilizam peças obtidas por este processo. Entre essas, encontram-se as indústrias de alimento e bebidas, química, eletro-eletrônica, têxtil, de calçados e de equipamentos para medicina.

A seguir, citam-se algumas aplicações específicas de peças dentro de cada campo de utilização:

- Máquinas têxteis - Lançadeiras, componentes do mecanismo de avanço do tecido, camas de sincronismo e outros;
- Bombas e válvulas - Rotores e corpo de bombas, corpos e cunhas de válvulas, etc.;

- Indústria automobilística - Rotores de turbinas para motores diesel, câmaras de pré-combustão, assento de válvulas, etc.;
- Indústria de armas - Alças de mira, gatilhos, pequenas alavancas, blocos de culatra, extratores, corpos de pistola, tambores, etc.;
- Indústria eletro-eletrônica - Chassis, guias de ondas, trocadores de calor, conectores e outros;
- Medicina - Implantes, próteses (ortopédicas, cardíacas), fórceps, etc.;
- Indústria aeronáutica - Componentes estruturais, componentes de motores, palhetas de turbinas, sistema de combustíveis, instrumentos, etc.

2.1.4 - REGRAS BÁSICAS PARA PROJETO DE PEÇAS

O processo de fundição de precisão tem como uma de suas principais características a grande liberdade de configuração construtiva. Através dessa característica, pode-se produzir peças de formas complexas, paredes com espessura reduzida, alta qualidade superficial e tolerâncias dimensionais estreitas.

Uma peça terá sua configuração adequada quando os critérios técnicos e econômicos conseguirem aliar a funcionalidade da peça com a sua qualidade.

Não obstante, toda a liberdade no projeto de peças requer a observação de algumas regras básicas com relação a três fatores:

- fatores econômicos
- fatores ligados à função e solicitação da peça
- fatores ligados ao processo produtivo.

Levando-se em conta o fator econômico, os projetistas devem evitar, sempre que possível, a concentração de massa, reduzir espessura de paredes, prever rebaixos e explorar as possibilidades da utilização de ligas mais adequadas.

O projetista deve optar pela utilização de canais internos curvos, obtidos por machos colocados na matriz de injeção. Este item de reduzir os custos, também melhora a funcionalidade da peça. Quando a utilização dos machos metálicos, na matriz, não é possível, pode-se optar pelo uso de machos cerâmicos ou machos de cera solúvel.

Outra maneira de reduzir custos, na fundição de precisão, é criar uma família de peças, aproveitando-se uma forma básica, externa ou interna, variando a outra de forma a se obter peças distintas. Este artifício possibilita a utilização de uma ferramenta para a obtenção de peças variadas, como é feito na produção de válvulas pneumáticas e hidráulicas, onde a forma externa é a mesma e a interna varia.

A fabricação de peças dentadas, acabadas por esse processo, nem sempre é economicamente viável, mas torna-se possível quando se obtém peças semi-acabadas, necessitando apenas uma pequena usinagem final.

Em alguns casos, o uso deste processo é o único meio de produzir dentados, como a figura 06 e nos casos citados a seguir:

- dentados entalhados e engrenados
- dentados acoplados

- dentados internos
- dentados cônicos
- dentados helicoidais
- dentados para correntes

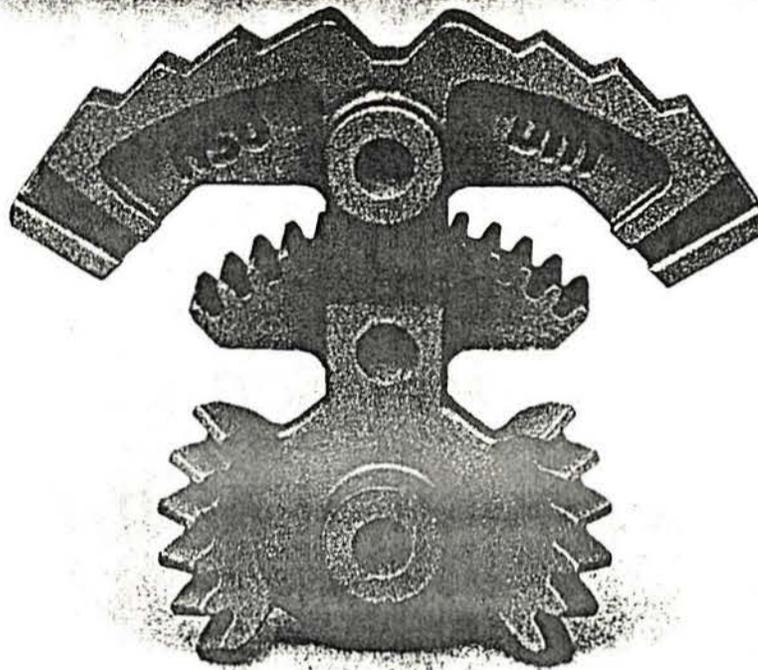


Figura 06 - Exemplo de peça feita por fundição de precisão, na qual é visível a complexidade da sua geometria e também sua baixa usinabilidade, pois a mesma é feita numa liga à base de CR, NI, MO, Nb¹⁵

Para o projetista é importante saber que a produção de peças com rosca é possível e é economicamente viável, quando o outro elemento for feito de borracha, plástico, material similar ou ainda quando as tolerâncias da rosca forem compatíveis com as fornecidas pelo processo

Estrias ou serrilhados podem ser obtidos simultaneamente desde que levados em conta alguns parâmetros. Os serrilhados cruzados só são usados quando extremamente necessários devido ao aumento dos custos.

Um fator que influi grandemente no custo final da peça é o alívio de massa, pois, este além de diminuir o peso, possibilita

reduzir o número e melhorar o posicionamento dos canais de alimentação necessários ao bom enchimento da peça.

Outro item a considerar é a função e as solicitações que a peça irá sofrer quando em uso. Para isso é importante que o projetista saiba que os cantos vivos devem ser evitados nas peças, pois estes são ponto de acúmulo de tensões.

O arredontamento dos cantos vivos utilizando raios de concordância adequados reduzirá as tensões internas e com isso haverá um aumento na resistência e na vida útil da peça.

Quando possível, o projetista deve propor a substituição de um produto composto por várias peças, obtidas por outros processos, tais como: usinagem e ou conformação e unidas por soldagem, parafusos ou mesmo rebitados, por uma peça única, usando fundição de precisão, como pode ser visto na figura 07.

Importante nesta mudança é salientar que peças únicas têm como grande vantagem, comparadas com as outras, a maior durabilidade e segurança quando são submetidas a esforços como vibração e a mudanças freqüentes de temperatura.

Ainda mencionando detalhes técnicos ligados à função e solicitação, recomenda-se em peças que funcionam como trocadores de calor, que suas nervuras sejam providas de seções retiráveis para favorecer o fluxo de calor e devem conter arredondamentos no fundo como nas bordas das aletas.

A partir de agora, as recomendações que serão relatadas estarão relacionadas diretamente com as limitações e capacidades produtivas do processo.

As porosidades e os rechupes devidos à contração do

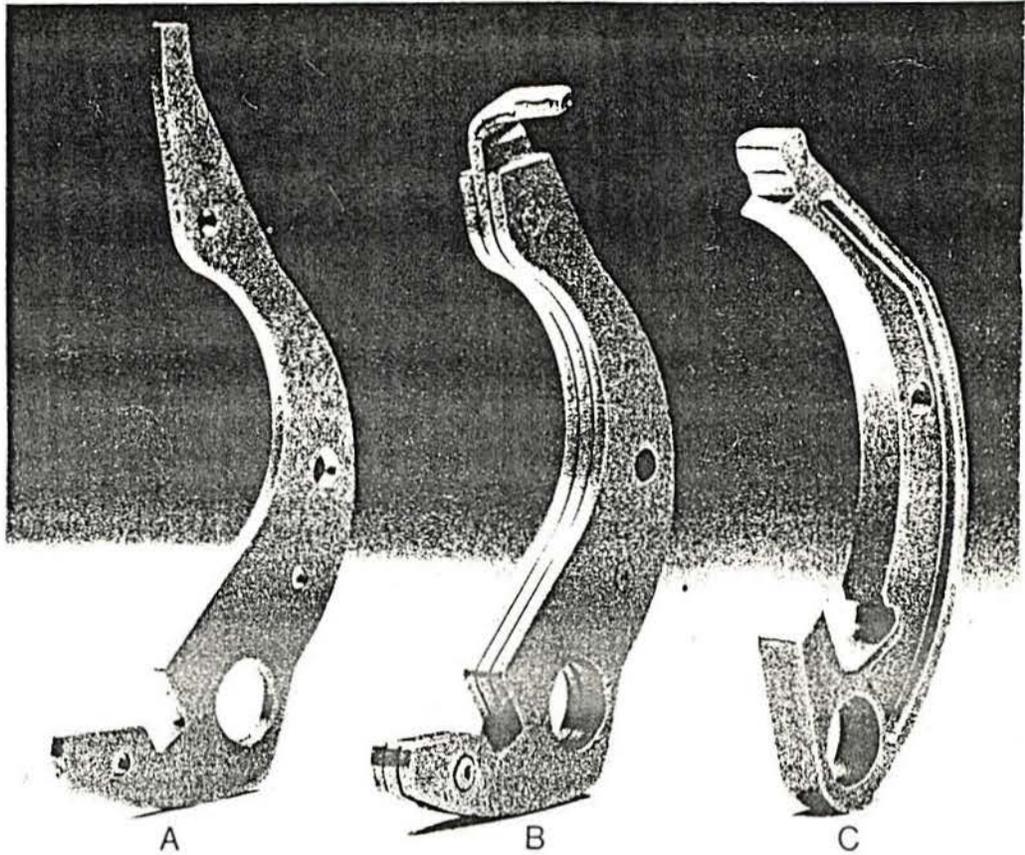


Fig. 07 - Em 'B' vê-se uma peça estampada, furada, cortada, dobrada, rebitada e calibrada, e em 'C' uma peça feita por fundição de precisão, para executar a mesma função, onde foi feito um novo projeto visando a melhor adaptação ao equipamento e aumentar a vida útil da peça, bem como a rigidez e o acabamento superficial

metal aparecem naturalmente na solidificação e a tarefa do projetista é retirá-las da peça e transportá-las para dentro dos canais de alimentação. Para isso, as peças devem ser projetadas de modo que sua seção diminua a partir do canal de alimentação e a solidificação ocorra no sentido contrário ao fluxo de metal.

Os cantos internos agudos devem ser evitados, pois estes atuam como pontos quentes, provocando o aparecimento de porosidades. Para tanto, recomenda-se a utilização de raios de concórdância ou rebaixos que correspondam, aproximadamente, a 20% da espessura da parede, mas nunca inferior a 0,5mm. (1) (11) (14) (15)

Recomenda-se ainda que em junções de paredes, as mesmas devam ser feitas de tal forma a evitar os cantos internos agudos e o acúmulo de massa.

O posicionamento dos canais de alimentação, nas peças, deve ser, se possível, nas superfícies externas planas e mais espessas. A superfície onde for colocado o canal não deve ser tomado como referência para medições e como referência para subseqüentes operações de usinagem.

Na fundição de precisão o uso de ângulos de saída não é necessário para todas as paredes. Só é usado em casos onde os contornos internos são muito profundos.

Em caso de peças com furos passantes, cegos, ou mesmo ranhuras, é indicado ao projetista seguir as relações constantes na tabela I.

TABELA I

APARECE A RELAÇÃO ENTRE O DIÂMETRO DO FURO OU A LARGURA DA RANHURA E SUA PROFUNDIDADE QUANDO NÃO SÃO USADOS MACHO¹

FURUS E CANAIS			RANHURAS E SIMILARES		
DIAM. FURO PASSANTE OU CEGO d (mm)	DIMENSÃO DO COMPR. OU PROFUNDID:		DIM. DE LARGURA DA RANHURA b (mm)	DIMENSÃO DA PROFUND. DA RANHURA	
	FURO PASSANTE _l	FURO CEGO _t		RANHURA ABERTA t	RANHURA FECHADA l
2 até 4	1 x d	0,6xd	2 até 4	1 x b	1,0 x b
4 até 6	2 x d	1,0xd	4 até 6	2 x b	
6 até 10	3 x d	1,6xd	6 até 10	3 x b	1,6 x b
10	4 x d	2,0xd	10	4 x b	2,0 x b

Para a obtenção de ranhuras ou furos passantes, indica-se o uso de machos não divididos e para furos cegos, recomenda-se que estes possuam o fundo arredondado.

Deve-se evitar no projeto peças com grandes superfícies planas; para isso, recomenda-se a decomposição desta superfície em menores, usando-se nervuras ou entalhes. Este recurso, além de facilitar a fundição, aumenta a resistência mecânica e uma conseqüente diminuição de peso da peça.

Sendo o uso de paredes finas uma das principais vantagens do processo, as espessuras mínimas freqüentemente usadas são 1,5mm ou 2,00mm. Estes valores podem diminuir, ainda, dependendo do material e do tamanho da parede. Para ligas, à base de Fe, Ni, Co e Ti pode-se obter espessura de 0,8mm a 1,0mm e de 0,8mm para ligas à base de Al e Cu.

Sugere-se aos projetistas evitarem cantos vivos em forma de cunha, recomendando-se acrescentar a esta um sobremetal para ser usinado posteriormente.

Para peças em que a fundição de precisão não fornece tolerâncias exigidas ou acabamento adequado e que por isso devam sofrer uma usinagem posterior, estas devem conter rebaixos ou raios de concordância que facilitem a entrada e saída das ferramentas.

Todas as recomendações para se projetar peças para fundição de precisão, até agora citadas, podem ser melhor compreendidas se analisados os desenhos e tabelas contidos no artigo número 1 da bibliografia, feito pelo Ministério da Indústria e Comércio.

2.1.5 - MATRIZES PARA MODELOS

Os modelos usados para a fundição de precisão são obtidos a partir da injeção de um material de baixo ponto de fusão em

**ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA**

uma matriz metálica. Para a produção de lotes experimentais ou mesmo para pequenos lotes, os modelos podem ser obtidos a partir de matrizes flexíveis ou serem usinados, no material do modelo, o que viabiliza mais o processo.

A escolha do material para os modelos está diretamente vinculada ao custo e à vida útil da matriz, bem como do material com que esta será feita.

Muitos materiais podem ser usados para a construção de matrizes, entre os quais encontram-se os metais macios (chumbo, bismuto e estanho), ligas à base de zinco, latões, bronzes, cobre-berílio, aço, borrachas, silicões, plásticos, metal-plástico, gesso e outros.

A utilização de cera para a obtenção de modelos permite o uso de qualquer um dos materiais acima citados, para a construção das matrizes, devido ao seu baixo ponto de fusão, sua boa fluidez e sua baixa abrasividade. O uso de plástico, na confecção de modelos, restringe ao aço e à liga cobre-berílio os materiais possíveis para a construção das matrizes, devido às altas pressões de injeção e também as temperaturas mais elevadas e a maior abrasividade comparada com a cera.

Para matrizes onde se utiliza cera como material a ser injetado, o alumínio e suas ligas são os materiais mais indicados, pois estes são fáceis de serem usinados, têm boa condutividade térmica, são leves, de fácil manuseio e têm baixo custo de usinagem. Em áreas onde há maior desgaste, podem ser colocados inserts de latão ou aço, para prolongar a vida útil da matriz.

O aço é usado, principalmente, para matrizes que irão trabalhar com plástico na produção de modelos pequenos e em gran-

de quantidade. Normalmente, as matrizes são construídas com aço P20 e P21 na condição pré-endurecido e são capazes de produzir 100.000 peças ou mais. ⁽¹⁷⁾

Na comparação entre matrizes feitas de aço e outras de metal menos resistente como o alumínio, vê-se que o custo da matriz de aço é de cinco a dez vezes o preço da feita com alumínio, mas o rendimento quanto ao número de peças é vinte vezes maior.

As matrizes são normalmente feitas pelo processo de usinagem utilizando máquinas de controle numérico e máquinas de eletro-erosão, produzindo matrizes com grande precisão dimensional e ótimo acabamento, características essas fundamentais para uma matriz. A qualidade da peça depende diretamente das condições da matriz, pois a cera ou plástico copiam todos os detalhes.

A fundição também pode ser usada para se obter matrizes, requerendo, para isso, um modelo positivo padrão com uma compensação dimensional para anular a contração do metal, mas este processo é pouco usado.

A produção de matrizes com materiais não metálicos tais como: gesso, plástico, borracha, silicone ou mesmo para produzir matrizes de metal ou faceadas com metal, usando metalização, eletro deposição, vaporização de metal e fundição sob pressão, ⁽¹⁶⁾ também necessitam de um modelo padrão positivo.

Apesar de ser mais barato e prático usinar um modelo positivo para produzir matrizes do que usinar uma cavidade negativa, no metal, estas têm seu uso limitado à precisão dimensional, ao número de modelos que podem ser obtidos, a problemas de deformação e durabilidade. Dependendo do número de peças injetadas de uma só vez, tamanho destas e da quantidade de peças, por lote, é

aconselhável que o canal de ataque e parte do canal central, façam parte da matriz. Este ítem é importante, pois evita defeitos posteriores na montagem dos cachos.

Para peças que possuam partes simétricas ou detalhes repetidos várias vezes, estas podem ser decompostas em partes menores, reduzindo os custos com as matrizes e possibilitando a utilização de máquinas de injeção com menor capacidade.

No projeto das matrizes, as regras são as mesmas usadas para projeto de peças, com algumas ressalvas.

As matrizes que devam ter locais de gravação recomenda-se que estas fiquem o mais paralelo possível ao plano de divisão. Recomenda-se, ainda, que matrizes com abertura e extração automática, os pinos de extração sejam colocados em superfícies de tal forma que não prejudiquem a peça, pois estes podem provocar rebaixos de 0,1mm⁽¹⁴⁾ devido a problemas de ajuste.

Furos de diâmetros diferentes, diâmetros que se cortam tangencialmente em matrizes, recomenda-se o uso de machos cerâmicos ou machos de cera solúvel para evitar a formação de cantos vivos, na matriz, que são prejudiciais à mesma, causando pontos quentes ou desgaste excessivo.

Existem matrizes dos mais variados tipos e formas possíveis, dependendo da aplicação das exigências e do número de modelos a serem produzidos. Podemos encontrar matrizes pequenas, de silicone, onde a cera é vasada por gravidade para o interior da mesma, até sofisticadas matrizes de aço ferramenta com vários machos, extratores automáticos e com refrigeração interna, as quais são acopladas a potentes máquinas automáticas de injeção cera.

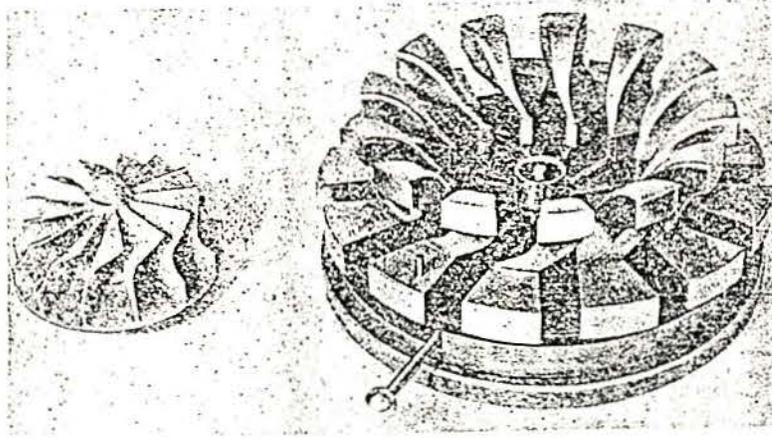


Fig. 08 - Matriz metálica feita em várias partes para possibilitar a retirada do modelo de cera, devido à complexidade da forma e da espessura das pás do rotor.⁴

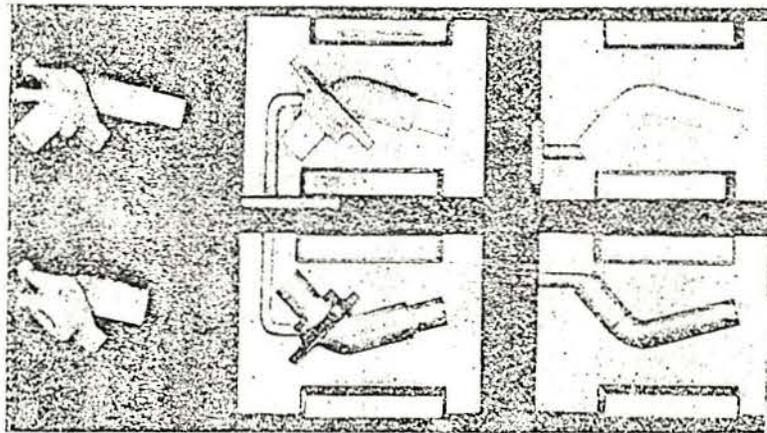


Fig. 09 - Seqüência para obtenção de um modelo de cera com macho solúvel. Da direita para a esquerda, tem-se uma matriz para a injeção do macho solúvel, ao lado uma matriz para injeção do modelo em cera com local para posicionamento do macho e bem à esquerda, um modelo em cera com macho e outra após a entrada do mesmo.⁴

2.1.6 - MATERIAIS PARA MODELOS

Os modelos usados em fundição de precisão podem ser feitos de diversos materiais, dependendo do formato, da quantidade e da qualidade da peça desejada.

Podemos citar alguns materiais tais como: plásticos, metais de baixo ponto de fusão, combinações de sais com baixo ponto de fusão, mercúrio congelado, misturas à base de uréia, determinadas amálgamas e ceras.

Os materiais mais empregados são as ceras e os plásticos, porém, em casos específicos, são usados os outros materiais devido a alguma peculiaridade. Dar-se-á ênfase às ceras, aos plásticos e ao mercúrio congelado, pois abrangem quase a totalidade dos modelos produzidos atualmente.

2.1.6.1 - CERAS

A cera é o material base preferido para a fabricação de modelos, porém, nenhuma cera pura apresenta todas as propriedades necessárias para se obter modelos de boa qualidade; torna-se necessário, então, fazer misturas de várias ceras para obter um produto que satisfaça todos os requisitos exigidos.

As ceras mais usadas para as misturas são:

- Ceras parafínicas - São derivadas do petróleo e são disponíveis em várias classes de pureza e ponto de fusão. Seu largo emprego está vinculado à sua alta lubricidade e baixa viscosidade no estado líquido. A alta contração e a sua fragilidade são os pontos negativos desta cera.

- Ceras microcristalinas - são derivadas do petróleo, possuem pon-

to de fusão elevado, são altamente plásticas e possuem contração elevada. Quando misturadas com outras ceras, têm a finalidade de proporcionar maior tenacidade.

- Ceras de polietileno - são derivadas da hulha, possuem peso molecular mais baixo que os plásticos de polietileno usuais.⁽¹⁶⁾ Têm ponto de fusão elevado e são duras. Quando misturadas a outras ceras proporcionam maior rigidez para os modelos.

- Ceras de candelila - derivadas de plantas, são moderadamente duras, levemente aderentes e baixa contração térmica, são usadas em misturas para aumentar a dureza e o ponto de amolecimento.

- Ceras de carnaúba - derivadas de plantas, têm ponto de fusão relativamente alto, baixa contração térmica, são duras e não aderentes.

A simples mistura das ceras anteriormente citadas melhoraram as propriedades, mas não é suficiente para eliminar os problemas de falta de resistência e rigidez dos modelos, bem como dos problemas dimensionais devido à contração.

Para minimizar estes problemas, pode-se adicionar alguns aditivos que têm a função de melhorar a qualidade das ceras.

A adição de plásticos de alto peso molecular, tais como nylon, polietileno e etil vinil acetato (EVA) aumentam a resistência e melhoram a tenacidade das ceras. Todavia, o uso destes aditivos é limitado visto que na temperatura de utilização das ceras, estes são altamente viscosos. Em grande quantidade deixam de ser benéficos e provocam o aumento do ponto de fusão da cera.

A utilização de resinas como aditivo serve para minimizar os problemas de contração. As resinas usadas possuem peso molecular baixo em relação aos plásticos e possuem baixa contração

térmica. Ao contrário do que ocorre com os aditivos plásticos, estes podem ser usados em grande quantidade, pois seus efeitos benéficos estão na direta proporção da quantidade usada.

A contração das ceras pode ser diminuída com o uso de enchedores. Esses enchedores são materiais sólidos com baixa contração na faixa de temperatura de uso e não devem ser solúveis na cera.

Os enchedores devem ter, preferencialmente, forma esférica e possuírem tamanho reduzido e uniforme. Os materiais mais usados são: poliestireno esférico, microesferas de carbono e partículas esféricas de plásticos de cura a quente.

Outros aditivos usados são os corantes que têm como finalidade facilitar a inspeção de qualidade nos modelos.

As ceras e as resinas usadas nas misturas não são muito estáveis e podem se degradar após certo período de tempo. Para minimizar este problema e evitar a oxidação provocada pela temperatura, usam-se aditivos anti-oxidantes.

As ceras resultantes das misturas devem ser caracterizadas e para isso suas propriedades físicas e mecânicas devem ser avaliadas e quantificadas. Normalmente, as propriedades e características avaliadas são: ⁽¹⁷⁾

- conteúdo de cinzas
- acabamento superficial
- resistência a primeira camada de refratário
- resistência a formação de goma
- viscosidade
- resistência a tração
- limite de transição dúctil-frágil com relação à temperatura

- faixa de solidificação
- resistência a oxidação
- molhabilidade
- coeficiente de contração térmica
- pureza
- temperatura de amolecimento
- solubilidade a solventes
- toxicidade

Dentre as propriedades citadas, a faixa de solidificação é de grande importância, pois é ela que determinará a forma com que a cera será injetada na matriz.

Ceras com pequena faixa de solidificação são injetadas, no estado líquido, e são indicadas para modelos que possuam seções finas e uniformes e para modelos que possuam machos de cera solúvel a cerâmicos.

Ceras com grande faixa de solidificação são injetadas, nas matrizes, de forma pastosa e a temperatura deve estar no topo da faixa. A injeção de cera pastosa é indicada porque as distorções dimensionais são menores.

2.1.6.2 - PLÁSTICOS

Depois das ceras, os plásticos são os materiais mais usados na fabricação de modelos para a fundição de precisão. Dentre os plásticos, o poliestireno é o mais usado porque possui grande facilidade para ser moldado, tem alta resistência, é muito estável e pode ser usado em equipamentos automáticos de alta produção.

A grande contração e expansão térmica dos plásticos são

os fatores que restringem seu uso, pois provocam a quebra das cascas cerâmicas quando do seu derretimento para a produção do molde. Outros fatores que restringem o uso dos plásticos são as altas pressões e o alto custo dos equipamentos necessários para a sua injeção.

Além do poliestireno, outros plásticos como o nylon e o polietileno podem ser usados, obtendo-se ótimos resultados.

O uso de plástico é indicado para modelos que possuem paredes muito finas e delicadas, pois estes têm boa resistência e não necessitam tantos cuidados no manuseio. Também é indicado para grandes lotes de peças pequenas e podem ser estocados por longo tempo, pois os plásticos são mais estáveis e não se deterioram como ocorre com as ceras.

O incremento de aditivos também é indicado para os plásticos e a lista de propriedades e características mencionadas para a cera também devem ser aplicadas para se ter uma correta caracterização dos materiais plásticos.

2.1.6.3 - MERCÚRIO CONGELADO

O fato do mercúrio estar líquido à temperatura ambiente e não apresentar variação volumétrica na passagem de líquido a sólido e sólido a líquido, o torna um material adequado para a fabricação de modelos para fundição de precisão.

Para a produção de modelos de mercúrio não é necessário o uso de máquinas injetoras e a montagem dos cachos é feita sem o uso de colas ou ferramentas térmicas, basta o simples contato entre o modelo e os canais.

A principal vantagem do uso do mercúrio está ligada à gran-

de precisão dimensional que se obtém, nas peças, se comparadas com os modelos de cera e plástico.

As desvantagens do uso do mercúrio estão relacionadas à baixa temperatura de solidificação. Para a obtenção dos modelos a matriz deve estar a uma temperatura de $-57^{\circ}\text{C}^{(17)}$, o que torna difícil o manuseio e provoca elevação nos custos de produção. Além do elevado custo do metal, a sua alta toxicidade limita a sua utilização a casos muito particulares.

2.1.7 - MONTAGEM DOS CACHOS

A montagem de cachos para modelos grandes não é viável, por isso são montados e processados individualmente. Os modelos médios e pequenos devem ser montados em cachos, que podem conter dezenas e até algumas centenas de peças.

Prevendo a montagem em cachos, a maioria das matrizes já são feitas com o canal de ataque junto aos modelos. Esse procedimento, além de economizar tempo e diminuir operações de montagem, garante uma perfeita harmonia entre canal e modelo, diminuindo os defeitos nas peças.

A montagem dos cachos é feita manualmente, na maioria dos casos, e consta da colagem dos componentes uns aos outros, conforme especificações do projeto. Os elementos que compõem os cachos são: copo de vazamento, canal principal, canal de ataque, modelos e massalotes.

Os componentes de cera podem ser unidos por meio de derretimento da própria cera da face a ser colada, por intermédio de uma espátula quente. O aquecimento da espátula pode ser por meio de chama ou eletricidade. A espátula é colocada em contato com

as faces a serem coladas a fim de provocar um rápido derretimento e então são comprimidas, uma contra a outra, até a ressolidificação da cera.

Após a colagem é preciso retocar a junta para evitar a formação de pequenas rebarbas, no molde cerâmico, provocadas por fendas entre as peças. Outra forma de unir modelos de cera a canais é colocando as faces em contato com cera líquida de baixo ponto de fusão e depois pressioná-las, entre si, até que a cera solidifique totalmente.

A operação de mergulhamento das faces, na cera, deve ser feita com muito cuidado para evitar o salpicamento de cera no modelo e evitar que estes fiquem muito tempo em contato com a cera aquecida, pois podem ocorrer deformações ou derretimento.

Modelos de cera podem ser unidos aos canais por meio de colas que tenham afinidade com as ceras. As juntas resultantes devem ser retocadas com cera ou com a própria cola, para tampar as fendas e promover o arredondamento dos cantos.

As operações de montagem dos cachos são manuais e exigem pessoas treinadas, com grande habilidade, além de acessórios e ferramentas adequadas para facilitar as operações e garantir boa precisão e alinhamento dos modelos.

A configuração dos cachos é fator crítico, no processo de fundição de precisão, porque todas as outras etapas de produção dependerão de como foi feita a montagem do cacho.

Os fatores que devem ser levados em conta, no projeto de montagem de um cacho incluem: facilidade para a montagem, número de peças montadas por tempo, razão entre metal e peça pronta, resistência ao manuseio, facilidade de manuseio na confecção da

casca, remoção da cera, fluxo do metal líquido, enchimento de seções finas, remoção da casca, facilidade de separação e acabamento das peças.

Os cachos montados devem satisfazer a três requisitos essenciais:

- ter tamanho apropriado e resistência suficiente para o manuseio do início ao fim do processo;
- satisfazer os requisitos metalúrgicos;
- fornecer corpos de prova para testes químicos e mecânicos.

Devido à montagem manual dos cachos e das inúmeras vezes que cada operação é repetida até que o cacho fique pronto, alguns erros de acabamento e montagem são cometidos.

Os erros mais comuns na montagem e acabamento dos cachos e problemas causados nos modelos ou peças, são descritos na tabela II

TABELA II - PROVÁVEIS DEFEITOS NAS PEÇAS FUNDIDAS COM POSSÍVEIS ERROS NA MONTAGEM DOS CACHOS⁽¹⁰⁾

E R R O S	D A N O S
- Imersão prolongada em cera fundida para a união por mergulhamento	- Recobrimento no modelo com cera - Falta de precisão dimensional - Fusão do modelo - Acabamento superficial ruim
- Solda frágil na união modelo-canal	- Separação dos modelos quando do manuseio e execução dos banhos de lama
- Sobreaquecimento do modelo durante a solda	- Distorção e ou fusão do modelo - Menor distância canal principal-modelo

- Mau acabamento da junta soldada	- Rebarba na casca cerâmica que provoca ponto quente - Quebra de rebarba e inclusão de material cerâmico na peça
- Respingo de cera ou cola no modelo	- Saliência na peça metálica - Acabamento superficial ruim - Peça refugada dependendo do local do respingo
- Manuseio inadequado dos modelos	- Peças com distorções, defeitos em cantos, marcas superficiais
- Modelos muito próximos	- Formação de vazios no revestimento cerâmico - Paredes fracas e quebra do molde
- Seções finas de peças muito próximas a canais	- Pontos quentes provocando contração (rechupe) ou rompimento de seção fina
- Má localização dos canais	- Dificuldade no corte para retirar as peças

Atualmente existem máquinas para montagens de cachos e também existem métodos para a soldagem de cera usando raio laser, o que possibilita montagens mais rápidas e com alta qualidade. Estes métodos só são possíveis de usar em altíssimas produções e peças que exijam alta qualidade.

2.1.8 - REVESTIMENTO CERÂMICO

Os moldes usados no processo de fundição de precisão são obtidos através de revestimento dos cachos em cera com material cerâmico.

O revestimento pode ser feito de duas maneiras distintas. Uma seria usando o método de moldes sólidos e o outro, o de mol-

des em casca. O uso de um ou de outro método irá depender do metal a ser vazado, do tamanho das peças e dos cachos e, também, do custo final da peça.

Antes da descrição dos métodos, é conveniente se conhecer alguns materiais cerâmicos e ligantes que são usados na confecção dos moldes.

2.1.8.1 - MATERIAIS REFRACTÁRIOS E LIGANTES

O revestimento cerâmico com a consistência de uma lama é aplicado sobre o modelo de forma a produzir uma camada uniforme. Para dar maior resistência à película de lama, aplica-se sobre esta, ainda úmida, outro material refratário na forma granular.

As lamas são formadas, basicamente, por uma substância líquida que é o ligante e um pó refratário que constitui a parte sólida da mistura.

A) - LIGANTES

Os ligantes podem ser:

- À base de álcool - Silicato de etila
 Silicato isopropílico
 Derivados de alquil silicato
 Silicatos modificados de amina
 "Chloralkoxides" de titânio e zircônio
- À base de água - Silicato de sódio
 Silicato de potássio
 Silicato de sódio potássio
- Soluções de sílica coloidal - contendo de 15% a 30% de sílica
- (i) Partículas pequenas 16 μ
 (ii) Partículas grandes 40 μ

Fosfatos aglomerados	- Fosfato de amônia DI-hidrogênio
	Meta fosfato de sódio
	Fosfato de alumínio
Gesso	- Misturas de gesso e sílica
Cimentos	- Cimentos aluminosos
	- Cimento PORTLAND

Os ligantes comumente usados são à base de materiais siliciosos. Entre eles encontramos o silicato de etila hidrolizado, o silicato de sódio e a sílica coloidal.

A sílica coloidal é largamente usada e é obtida através da remoção de ions de sódio do silicato de sódio, passando, então, o produto a ser uma dispersão coloidal de partículas esféricas de sílica em água.

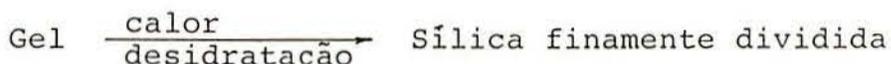
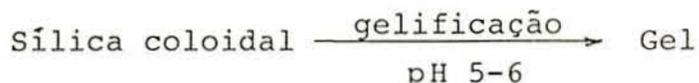
A dispersão é estabilizada por cargas iônicas, que provocam a repulsão entre as partículas, evitando que ocorra a aglomeração e posterior decantação das partículas. As cargas iônicas que provocam a estabilidade da dispersão podem ser de sódio ou de amônia.

A sílica coloidal é um excelente ligante de uso geral. Sua grande desvantagem em relação aos outros ligantes é o fato de necessitar de longo período de tempo para a cura, por ser a base de água.

O tipo mais usado de sílica coloidal é a estabilizada com sódio e com 30% de sílica e o tamanho médio das partículas é em torno de 7 ou 12×10^{-9} mm.

A partir do ligante, pode-se obter um gel consistente, de excelentes propriedades. Para que ocorra a gelificação, basta adi-

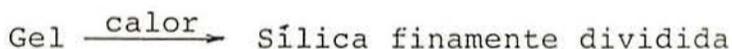
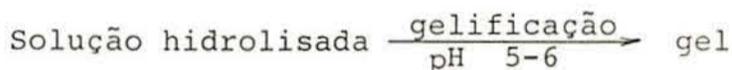
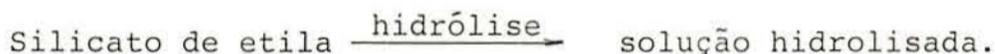
cionar ions positivos ou então fazer que o pH do ligante passe da faixa de 8,5 a 10 para a faixa ácida de 5 a 6. (4)



Outro ligante largamente usado é o silicato de etila, ele é obtido por meio da reação do tetra cloreto de silício com alcool etílico.

O resultado da reação é o tetra-etil-orto-silicato que tem 28,8% de sílica e é o produto base para se obter o silicato de etila, contendo 40% de sílica que é comumente usado.

O silicato de etila não possui a propriedade de adesão. Para que ele adquira esta propriedade é necessário fazer sua hidrólise, usando-se o alcool etílico como solvente, tanto da água como do silicato, e ácido hidrocloreídrico que tem como função acelerar a reação. (16)



O silicato de etila cura mais rapidamente que a sílica coloidal devido à alta volatilidade do alcool. A cura pode ainda ser acelerada com o uso de uma atmosfera rica em amônia. Suas principais desvantagens são o alto custo, o risco de incêndio e a necessidade de equipamento de exaustão, no local, devido à toxicidade dos vapores do alcool.

O terceiro, entre os ligantes mais usados, é o silicato

de sódio. Embora seu baixo custo seja um forte atrativo, entre suas características, este ligante produz lamas que depois de aplicadas sobre os modelos e deixadas curar, propiciam alta resistência a verde e adesão vítrea. Sua aplicação é, no entanto, limitada devido à sua baixa refrateriedade e por não permitir o derretimento dos modelos em autoclaves, pois o silicato de sódio é higroscópico e em contato com o vapor pode se desmanchar.

B) - PÓS REFRACTÁRIOS

Os pós refratários são a parte sólida das lamas usadas em fundição de precisão e como material de estudo para dar resistência aos moldes cerâmicos. Os materiais mais usados, normalmente, são os refratários siliciosos e, entre eles, encontram-se a sílica, o zircão e vários silicatos de alumínio, compostos de mulita e sílica livre.

Materiais como alumina, grafite, sircônia, ítrio, tório, óxido de cálcio e outros têm sido usados em casos especiais, tais como ligas com alto ponto de fusão e ou ligas altamente reativas com os materiais siliciosos.

A sílica é usada na forma fundida, pois assim possui baixa expansão térmica e não tem o inconveniente da passagem da fase α para a β a 573°C ⁽²⁾ ⁽⁶⁾ que provoca uma expansão abrupta que ocorre com a sílica na forma de quartzo natural.

A sílica fundida é obtida pela fusão do quartzo obtendo-se, então, o vidro. O vidro é moído e peneirado para a obtenção de um material granulado, que será usado como estuco ou é moído até virar pó a ser usado na produção de lama refratária.

A baixa expansão térmica, a alta resistência ao choque térmico e sua pronta solubilidade em soluções cáusticas, justifi-

cam seu grande emprego, na produção de moldes cerâmicos, para fundição de precisão.

Em moldes feitos com sílica fundida não é indicado o vazamento do metal assistido a vácuo ou processo contra a gravidade, onde o vácuo é usado para provocar a diferença de pressão, pois pode degradar-se e provocar sérias reações molde-metal.

Dentre os materiais refratários, provavelmente, o mais usado seja o silicato de zircônio que é encontrado na forma de areia, e pode ser usado como estuco das primeiras camadas, como é encontrado na natureza. Moendo-se a areia de silicato de zircônio obtém-se o pó usado na confecção da lama. As lamas à base de silicato de zircônio proporcionam uma qualidade superficial boa, possuem baixo custo, produzem moldes cerâmicos estáveis a altas temperaturas e são resistentes ao ataque dos metais. O zircão pode ser usado em moldes vazados a ar como nos vazados a vácuo.

Devido à forma arredondada dos grãos, a cobertura dos modelos consumíveis é boa e a adesão é razoável, pois o contato é ponto a ponto entre os grãos.

Entre as desvantagens, no uso do silicato de zircônio, pode-se citar a dificuldade de enchimento de peças com paredes muito finas, devido à sua alta condutividade térmica.

Os silicatos de alumínio podem ser usados tanto como estuco e como pó para confecção de lamas. São obtidos através da calcinação da argila de forma a se obter alumina, em índices que podem variar de 42 a 72%. O único produto estável a altas temperaturas, obtido da calcinação, é a mulita, que é composta 72% de alumina e 28% de sílica livre.

A mulita, na forma granular, pode ser usada como estuco

e moído até obter-se pó para elaboração de lamas.

Outro material usado é a alumina pura, que é obtida a partir da bauxita usando-se o processo Bayer. O uso da alumina é limitado por causa de sua baixa resistência ao choque térmico mas tem seu uso indicado quando o metal é vazado a altas temperaturas e quando este reage com a sílica.

2.1.8.2 - MOLDES SÓLIDOS

Após a montagem dos cachos, estes devem ficar em uma sala climatizada, com temperatura e umidade controladas, durante vinte e quatro horas, para que ocorra a homogeneização da temperatura do cacho. Decorrido este tempo, os cachos estão aptos à produção dos moldes.

A elaboração do molde inicia com o revestimento de lama sobre o modelo. A lama pode ser depositada por mergulhamento, pintura ou pulverização. Este recobrimento deve ser uniforme e compacto, pois é esta fina camada de lama que irá formar as paredes internas do molde e fornecerá a reprodutibilidade dos detalhes e o acabamento superficial nas peças.

Sobre a camada de lama, ainda úmida, aplica-se um material refratário granular que irá aderir e passará a dar resistência mecânica à casca. O processo de aplicação de refratário granular chama-se estucagem. Logo após a estucagem, o cacho é levado à sala climatizada para que ocorra a secagem.

O cacho, após a secagem, é fixo sobre uma placa base com o copo de vazamento virado para baixo. Fixa-se também um cilindro metálico bipartido, sobre a placa base e em volta do cacho. Prepara-se uma lama usando um material granular mais grosseiro e

verte-se sobre o cacho. O espaço entre o cacho e o cilindro é totalmente preenchido de forma a produzir um bloco único e compacto.

O cilindro é recolocado na sala climatizada para que seque e adquira resistência.

O molde sólido está pronto, bastando retirá-lo da placa base e efetuar o derretimento do modelo. Após o derretimento, o cilindro pode ser retirado e o molde sólido pode ser levado para a sinterização.

O processo de molde sólido não é muito usado, atualmente, na indústria, pois é pouco econômico, visto que o material do molde não pode ser reaproveitado após a desmodelagem, possui um tempo de secagem longo e também tem problemas de troca de calor devido as paredes não serem uniformes e muito grossas, em certos pontos.

2.1.8.3 - MOLDE CASCA

A utilização de moldes casca surgiu para melhorar algumas das desvantagens. O método de produção de casca é igual ao sólido até ao fim da primeira camada de lama e sua estucagem.

As diferenças estão nas operações seguintes, pois a formação da casca é obtida pela seqüência de mergulhamento, drenagem, estucagem e posterior secagem até que uma camada espessa de material refratário fique depositado e seja suficiente para resistir o derretimento do modelo e o vazamento do metal.

A lama usada a partir do segundo mergulhamento não necessita ser feita com pó muito fino, pois a função é dar resistência à casca. O material do estuco pode ser granulometria maior

e pode ir aumentando progressivamente, para melhorar a permeabilidade.

O método de casca diminui custos com o material, tempo total de secagem, possui paredes mais uniformes, possibilitando melhor troca de calor e aumenta a permeabilidade do molde.

2.1.8.4 - CONFECÇÃO E CONTROLE DE LAMAS

A elaboração das lamas é praticamente simples, basta adicionar, lentamente, o pó refratário ao tanque contendo o ligante.

Para efetuar a mistura é necessário um misturador. Este equipamento pode ser basicamente de dois tipos, um onde o recipiente (tanque) é fixo e a agitação é feita através de uma hélice ou pá e o outro tipo em que o tanque gira e a pá fica fixa.

A agitação serve para promover a mistura do pó ao ligante e para evitar que após a mistura ocorra a decantação da parte sólida, mantendo a homogeneidade da mistura. A velocidade de agitação do misturador pode ser reduzida depois de efetuada a mistura, pois reduzindo a turbulência, diminui a inclusão de ar na lama.

A adição do pó deve ser lenta e gradual para evitar a formação de torrões devido a fina granulometria deste.

Completada a mistura, a lama só poderá ser utilizada após vinte e quatro hora, pois este é o tempo estimado para que a completa homogeneidade ocorra e para que os testes realizados tenham confiabilidade.

Entre os testes a serem realizados estão os de viscosidade, PH, densidade, quantidade real de pó e ligante e teste de

retenção cerâmica.

O teste de viscosidade é feito utilizando-se o método ZAHN. (22) Este método consiste em mergulhar um copo, com volume predeterminado e com um orifício no fundo, dentro da lama, e depois levantá-lo e medir o tempo que levará para que o fio de lama que escorre pelo orifício se interrompa parcial ou completamente.

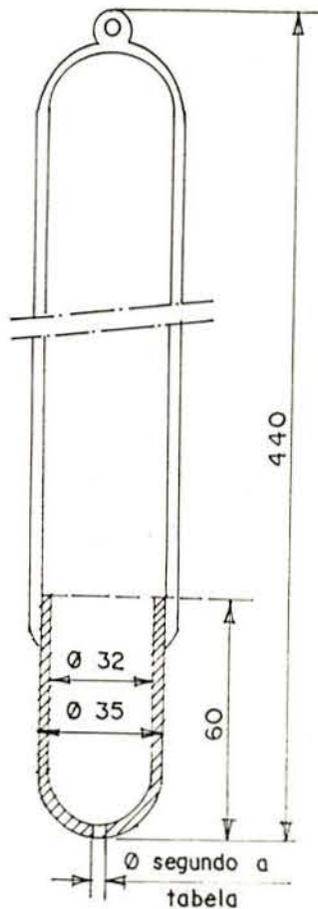


Fig. 10 - Desenho de um copo ZAHN com suas medidas padrões¹⁰

A viscosidade adequada será definida em função do tipo de dificuldades que o modelo venha a oferecer, na hora da deposição da primeira camada. Dificuldades tais como: pequenos orifícios, cavidades, entalhes e outros que não permitem a entrada da lama se esta não tiver viscosidade adequada, causando defeitos na peça.

TABELA III - RELACIONA O TEMPO OBTIDO NOS
TESTES COM O COPO ZAHN E SEU
VALOR EM POISE¹⁰

Nº DO RE- CIPIENTE	DIÂMETRO DO ORIFÍCIO EM mm	CAMPO DE EMPREGO	
		Segundos ZAHN	Centipoises
1	1,98	40 - 65	20 - 85
2	2,74	20 - 70	30 - 170
3	3,76	25 - 60	170 - 350
4	4,27	20 - 65	200 - 900
5	5,28	15 - 60	250 - 1200

A viscosidade adequada será definida em função do tipo de dificuldades que o modelo venha a oferecer, na hora da deposição da primeira camada. Dificuldades tais como: pequenos orifícios, cavidades, entalhes e outros que não permitem a entrada da lama se esta não tiver viscosidade adequada, causando defeitos nas peças.

O PH das lammas pode ser avaliado por dois métodos distintos: o primeiro é mais usado e utiliza um papel indicador, o qual é colocado em contato com a lama e depois é feita a comparação de sua cor com uma tabela padrão de cores que fornecerá o valor do PH da lama. (22)

No outro método usado, o PH é determinado através da utilização de aparelhos medidores de PH, que utilizam soluções padrão para comparar com a lama.

Assim como a viscosidade e o PH, a determinação da densidade também é importante.

A densidade pode ser avaliada utilizando-se um balão volumétrico graduado para 100ml, coloca-se lama no balão e efetua-

se a pesagem do mesmo. Do valor obtido desconta-se o valor do balão volumétrico vazio e, então, obtém-se o peso real de 100 ml de lama. Dividindo o peso da lama pelo seu volume 100 ml (100cm³), obtém-se o valor da densidade da lama em g/cm³.

O acabamento superficial das peças está ligado diretamente à combinação entre viscosidade e a densidade e, por isso, o controle deve ser diário, possibilitando a correção da lama para que os padrões fiquem dentro do especificado, dando confiabilidade ao método produtivo.

O teste de cobertura ou, também conhecido como teste de retenção cerâmica, pode ser feito de duas maneiras distintas. Uma delas consiste em mergulhar uma placa, com a área e o peso conhecidos, numa lama primária e depois drená-la, como se faz com os modelos. Nestes testes não é feita a estucagem e após a secagem da lama efetua-se a pesagem da placa. O valor do peso medido é descontado do peso inicial da placa e o valor da retenção cerâmica é obtido em g/cm².

O outro método utiliza um aparelho que fornece a retenção cerâmica a partir de uma lâmina de vidro coberta de lama, que é exposta a uma fonte de luz que é capaz de medir a quantidade de luz que passa pela lâmina e assim fornece a quantidade de cerâmica retida na amostra.

Basicamente o aparelho é constituído de uma fonte geradora de luminosidade, colocada em uma das extremidades de um tubo e na outra colocam-se células foto-resistoras. A maior ou menor incidência de luz sobre as células irá provocar uma variação na resistência interna das mesmas, que por meio de um ohmímetro pode ser medida.

Entre a fonte luminosa e a célula foto resistora coloca-se uma lâmina de vidro banhada em lama. A leitura feita no ohmímetro é então comparada com uma tabela obtida por calibração e tem-se o valor da retenção cerâmica. (23)

As propriedades das lamas podem ser alteradas mediante a adição de substâncias. As propriedades, de molhamento da lama em relação à cera. Da eliminação das bolhas de ar. Do aumento da resistência à verde da casca e o aumento da capacidade de nucleação provocada pela casca, podem ser adquiridas pela adição de certas substâncias à lama.

São chamadas de agentes de molhamento as substâncias que servem para diminuir as tensões que existem entre a cera ou a fina película de desmoldante com a água contida na lama. A adição correta dos agentes de molhamento eliminam as operações de lavagem para desengorduramento dos modelos. (24)

Os agentes anti-espumantes são adicionados para facilitar a eliminação das bolhas de ar do interior da lama, bolhas estas decorrentes da agitação forte demais ou do mergulhamento dos cachos. Este aditivo faz com que a viscosidade da lama diminua, pois elimina o ar retido, que é um dos motivos de elevação da mesma.

Pode-se, ainda, adicionar substâncias à lama primária que irão funcionar como agentes nucleantes quando da solidificação do metal dentro do molde cerâmico.

Para as lamas à base de água, recomenda-se o uso de agentes anti-bactericidas, para evitar a proliferação de bactérias que venham a modificar o PH ou, ainda, formar bolhas de gás, no interior da lama.

2.1.8.5 - CASCAS CERÂMICAS E SUAS PROPRIEDADES

Executadas todas as etapas de mergulhamento e estucagem do cacho, obtém-se a casca que passa a ter suas características e propriedades.

Entre as propriedades, as mais importantes são: a permeabilidade a frio ou a quente, a resistência a verde e após a calcinação e o tempo de secagem das camadas durante a obtenção da casca.

A avaliação da permeabilidade dos moldes cerâmicos é de grande importância, principalmente, em processos de vazamento assistido a vácuo ou processo contra a gravidade com uso de vácuo ou baixa pressão. Uma permeabilidade adequada facilita o escoamento dos gases gerados pelo contato metal molde.

Para avaliar a permeabilidade da casca necessita-se de um corpo de prova, com a forma de um cone, que é banhado em lama e estucado, nas mesmas condições dos cachos.

O modelo do cone é derretido e depois o cone cerâmico é levado à sinterização e, após, é deixado esfriar e a seguir colocado em um permeâmetro de Dietert. (25) (26)

A permeabilidade da casca é então obtida usando-se a fórmula I:

$$P = \frac{Ve}{pAt} \quad (I)$$

P = Permeabilidade

A = Área interna do corpo de prova (cm²)

V = Volume de ar que passa pela casca (cm³)

t = Tempo que o volume de ar leva para atravessar a casca (s)

p = Pressão do ar que passa pela casca (cm H²O)

e = Espessura da casca (cm)

A permeabilidade é, portanto, expressa em $\text{cm}^4/\text{cm}^3\text{s}$ e é definida como sendo o volume de ar, que a pressão de um centímetro de coluna d'água, durante um segundo, atravessa uma casca cerâmica de um centímetro de espessura e com a área de um centímetro quadrado. (20)

Devido à dificuldade de se obter a espessura da casca com precisão, motivada pela irregularidade da parte externa da mesma, adota-se para o cálculo da permeabilidade a fórmula II:

$$P = \frac{V}{p A t} \quad \text{Em cm}^3 / \text{cm}^3\text{S (II)}$$

Este método indica a permeabilidade da casca à temperatura ambiente, o que não ocorre quando o metal é vazado, pois o molde é pré-aquecido.

Para determinar a permeabilidade a quente, existe outro método. Este consiste em avaliar a permeabilidade usando um modelo esférico ao qual é unido um tubo de quartzo. O modelo esférico é banhado em lama e estucado nas mesmas condições dos cachos. Após a formação da casca, o modelo é derretido e a casca esférica unida ao tubo de quartzo e levada para sinterização.

Realizada esta etapa, o conjunto é mantido no forno, à temperatura em que o cacho será usado, e pelo tubo faz-se passar um determinado volume de ar, a uma pressão predeterminada, por um período de tempo.

De posse desses valores, entra-se na fórmula II, anterior, e obtém-se o valor da permeabilidade.

Outro teste muito usado é o da resistência das cascas. O teste é de fácil execução, bastando para isso um corpo de prova

plano, em forma de uma lâmina, com revestimento feito nas mesmas condições dos cachos.

Deste corpo de prova mede-se a largura e a espessura aproximada, pega-se a lâmina e coloca-se sobre dois apoios com distância predeterminada. Na distância média entre os apoios aplica-se uma carga, que vai aumentando gradualmente, até que a casca rompa.

De posse desses valores entra-se na fórmula III. (9) (27)

$$Mr = \frac{3}{2} \frac{Q L}{X C^2} \quad (\text{III})$$

Q = Valor da carga de ruptura (kg)

L = Distância entre apoio (cm)

C = Espessura da casca (cm)

X = Largura da casca (cm)

Mr = Módulo de ruptura ($\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$)

Este método é usado tanto para cascas sinterizadas como para cascas verdes.

Há importância em saber-se o módulo de ruptura da casca, a verde, é explicada porque ela é submetida a esforços, no derretimento do molde, ou seja, antes da sinterização.

Existem, também, testes que avaliam o tempo de secagem (cura) de cada camada aplicada sobre o modelo. A avaliação do tempo de secagem pode ser feita utilizando-se métodos bastante simples. O primeiro é baseado na diferença de peso. Para isto, basta dar um banho de lama e posterior estucagem, no cacho, colocando-o em uma balança sensível, marcando o tempo que leva para que o peso do cacho fique estabilizado.

O segundo método, um pouco mais trabalhoso, é avaliar o

tempo de secagem por meio da variação da resistência elétrica da casca. (28) Consiste em colocar dois eletrodos, na superfície do modelo, e conectá-los em um ohmímetro sensível. Enquanto a casca estiver úmida a resistência será baixa, à medida que esta for secando, a resistência vai aumentando até que fique constante. O tempo de secagem é entre a saída do banho de lama e a estabilização da resistência.

Existem artifícios para diminuir o tempo de secagem de cada camada. Entre eles temos: corrente de ar forçado, atmosfera rica em amônia e substâncias adicionadas ao material de estuco, que reagem com o ligante. (29) (30)

2.1.8.6 - REMOÇÃO DOS MODELOS (Desceramento)

A operação de remoção dos modelos, de dentro do molde cerâmico, é crítica devido à grande diferença entre as taxas de expansão térmica do modelo (cera ou plástico) e o material refratário do molde.

O aumento do volume do molde provoca uma pressão de dentro para fora, na casca, que pode provocar trincas em pontos críticos ou até mesmo a quebra da casca com desprendimento de pedaços.

A diferença das taxas de expansão é tão grande que ao colocar-se um cacho que estava em uma sala climatizada a 27°C em um ambiente a 37°C, o revestimento cerâmico quebrará em 10 a 15 minutos. (17)

Existem, basicamente, dois métodos para a remoção dos modelos. Um desses métodos consiste em fornecer uma pressão externa à casca para contrabalançar a pressão exercida pela expan-

são do modelo. No outro método, provoca-se o derretimento ou a dissolução da camada superficial do modelo, produzindo um pequeno vão que permitirá a posterior expansão.

Baseados nestes dois métodos, existem inúmeros processos de remoção de modelos, dos quais alguns serão mencionados a seguir.

A remoção dos modelos de cera pode ser feita com o auxílio de um material granular aquecido, que fornece o calor necessário para a cera derreter e, em contrapartida, proporcionar uma pressão externa. Nesse processo coloca-se o cacho, com o copo de vazamento para baixo, dentro de um recipiente metálico, com um orifício na parte inferior, de maneira que o copo de vazamento coincida com o orifício. Um material refratário ou granalha de metal é aquecido e depois de vertido dentro do recipiente contendo o cacho. O adensamento do material granular é feito por meio de um vibrador. O calor é transferido à casca e da casca para a cera, que derrete e escoar pelo orifício, no fundo do recipiente.

A cera pode ser reaproveitada quase que na totalidade, pois as temperaturas empregadas no processo são baixas, na faixa de 200°C a 400°C, dependendo da espessura da casca e do volume de cera a ser derretido.

Uma variante deste processo utiliza um leito fluidizado aquecido. Neste caso, o cacho é introduzido no leito, com o copo de vazamento para cima. O ar é desligado, fazendo com que o refratário granular aquecido fique compacto ao redor do cacho. Este permanece assim até que a cera fique derretida. Novamente ligado o ar, o cacho é retirado e pendurado com o copo de vazamento para baixo para que a cera escorra, em uma bandeja.

Os modelos de cera também podem ser removidos usando-se o método de derretimento ou dissolução de uma camada superficial. Um dos processos que usa este método, utiliza vapores de solventes para dissolver a cera.

Em uma bandeja com sistema de aquecimento é colocado o solvente líquido. Sobre a bandeja, pendura-se o cacho com o copo de vazamento para baixo e deixa-se que o vapor do solvente impregne a casca. Devido à porosidade da casca, o vapor do solvente entra em contato com a cera e dissolve a superfície em contato com a casca, criando uma cavidade, que permitirá a expansão da cera, quando esta estiver derretendo devido ao calor gerado pelo sistema de aquecimento da bandeja.

A cera derretida escorre para dentro da bandeja, misturando-se com o solvente, mas pode ser recuperada posteriormente, com a destilação da mistura.

Para este processo de desceragem, a permeabilidade da casca é de fundamental importância, pois a lenta penetração do vapor pelos poros pode provocar a dilatação da cera, antes da formação da cavidade.

Existe outro processo usando solvente, só que neste, o solvente não é aquecido. Processa-se da seguinte maneira: mergulha-se o cacho, entre a terceira e a quarta camada de lama, para que dissolva uma fina camada e provoque a formação da cavidade necessária para a dilatação da cera. O cacho é deixado secar e depois termina-se dando os banhos de lama necessários para a formação da casca.

Quando a casca estiver com a espessura desejada, pode ser levada a um forno com temperatura baixa para que a cera seja to-

talmente derretida e eliminada do molde.

O processo mais simples e mais usado para remover os modelos de cera ou de plástico é o de introduzir os cachos em um forno a alta temperatura, para que se obtenha um grande gradiente térmico entre o molde e o modelo. Isso provocará o derretimento da superfície do modelo, criando uma cavidade para que o restante do modelo possa expandir livremente.

A temperatura, no interior do forno, deve estar entre 900 e 1000°C e a remoção do modelo estará completa de 10 a 20 minutos após a introdução do cacho no forno.

O forno deve conter orifícios, na parte inferior, para que a cera ou plástico possam cair dentro de uma bandeja com água e possam ser reaproveitados posteriormente.

O índice de reaproveitamento não é grande, devido à alta temperatura da operação. A temperatura elevada pode provocar a queima da cera ou a evaporação de alguns componentes, descaracterizando a mistura inicial.

Outro processo que usa um grande gradiente térmico para efetuar a remoção de modelos de cera é o que utiliza autoclave como equipamento para se obter este gradiente.

O cacho é colocado dentro do autoclave com o copo de vazamento voltado para baixo. O autoclave é fechado e é injetado vapor d'água a uma pressão de 6kgf/cm² e a temperatura de 160°C o que provoca a liberação de aproximadamente 540 Kcal/kg de água. Essa quantidade de energia liberada é suficiente para derreter a superfície do molde antes que ocorra a dilatação.

O reaproveitamento da cera, neste processo, chega a 90%

e a baixa temperatura não descaracteriza a mistura inicial.

O processo conhecido como banho-maria é outra opção para a remoção dos modelos. O procedimento nesse caso é simples, basta mergulhar o cacho em recipiente aquecido, contendo cera líquida e esperar que a cera do modelo derreta. Pendura-se o cacho sobre o tanque de cera com o copo de vazamento para baixo para que toda a cera escorra.

A temperatura do banho de cera não deve ser inferior a 220°C pois pode ocorrer a quebra da casca e não deve ultrapassar em muito este valor, porque a cera pode entrar em combustão.

Os modelos feitos com plástico são normalmente revestidos pelo método de molde sólido e são removidos pelo processo de choque térmico, em forno, como já foi mencionado.

Em alguns casos específicos, os modelos são feitos com plásticos solúveis e solventes e então o revestimento cerâmico pode ser feito pelo método casca, o que permite a remoção dos modelos, usando os processos que utilizam vapores de solvente aquecido ou mergulhamento em tanque com solvente.

O processo mais recente para a remoção dos modelos de cera ou plástico utiliza forno de micro-ondas. Este novo processo propicia um reaproveitamento do material do modelo acima dos obtidos com o uso de autoclave e ainda tem a vantagem de não transferir umidade à casca.

2.1.8.7 - SINTERIZAÇÃO

Após a remoção dos modelos, obtem-se uma fina casca cerâmica, que possui baixa resistência mecânica, podendo ser esfarelada facilmente.

Quando do vazamento do metal, no molde, este deve ser suficientemente resistente para suportar a pressão do metal aquecido e não permitir que o fluxo do metal provoque a erosão das paredes.

Para que o molde adquira estas características, é necessário efetuar a sua sinterização. A sinterização é o processo que proporciona a aglomeração de pequenas partículas através do aquecimento.

Existem dois tipos de sinterização, sendo um, a aglomeração caracterizada pela formação de uma fase líquida e o outro pela aglomeração através da difusão de sólidos.

A sinterização com formação da fase líquida é feita com a elevação da temperatura logo acima da linha sólidos, para que ocorra a formação de um vidro, em materiais siliciosos.

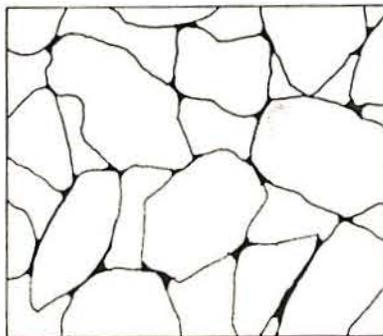


Fig. 11 A - Sinterização vítrea. Um silicato vítreo (negro) se forma quando o material é aquecido acima da linha de 'solidus'. O vidro não se cristaliza durante o resfriamento mas forma uma forte ligação entre as partículas⁽³⁾

Ao retornar à temperatura ambiente forma uma ligação vítrea muito resistente. A adesão do vidro às partículas é muito forte, devido à coerência existente entre as estruturas atômicas.

A sinterização sólida ocorre abaixo da temperatura 'solidus', em regiões de alta energia, que surgem nos átomos da superfície das partículas, porque estes só possuem vizinhos de um lado.

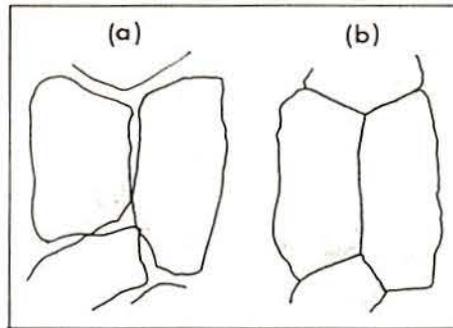


Fig. 11 B - Sinterização sólida (a) As partículas antes da sinterização possuem duas superfícies adjacentes. (b) Os grãos após a sinterização possuem um contorno. A força motora da sinterização é a redução da área superficial e, portanto, da energia superficial⁽³⁾

Com a elevação da temperatura, os átomos se movem por difusão e a região de contato aumenta e com isso aumenta a adesão entre as partículas e, em consequência, aumentam a resistência mecânica e a resistência à erosão das paredes.

Durante o processo de sinterização ocorre a eliminação dos resíduos de cera ou plástico que, por algum motivo, ainda se encontrem no interior do molde e, também, a eliminação de toda a umidade da casca.

Os moldes cerâmicos feitos a partir de ligantes como sílica coloidal, silicato de etila e silicato de sódio são sinterizados a temperaturas que variam de 900°C a 1000°C, em períodos de tempo que oscilam entre 1 e 2 horas.

É aconselhável que a atmosfera do forno de sinterização seja oxidante, para eliminar qualquer resíduo orgânico que possa conter o molde.

Após feita a sinterização, os moldes são deixados a esfriar para que atinjam a temperatura ideal para realizar o vazamento do metal ou até a temperatura ambiente para fazer a estocagem.

Para que moldes estocados sejam usados, é preciso um pré aquecimento para eliminar a umidade absorvida durante o período de estocagem e para atingir a temperatura ideal para o vazamento.

A temperatura ideal do molde é estipulada, levando-se em conta o metal a ser vazado, o sobre aquecimento do banho, a geometria da peça e o material do molde.

2.2 - MÉTODO DE FUSÃO E VAZAMENTO DE METAIS USADOS EM FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

2.2.1 - MÉTODOS DE FUSÃO

No processo de fundição de precisão os métodos utilizados para fusão do metal são, basicamente, os mesmos usados nos demais processos de fundição.

Para a elaboração e fusão das ligas metálicas pode ser usado qualquer tipo de forno. Usam-se fornos simples como os aquecidos a óleo ou a gás, até fornos sofisticados como os aquecidos à base de feixes de eletrons (Eletron Beam).

Quanto à atmosfera que envolve o forno na operação de fusão e preparo das ligas metálicas, estas pode ser simplesmente ao ar, em atmosfera controlado com o uso de gases inertes ou ainda

sob vácuo.

Para casos em que a fusão deve ser executada ao vácuo, alguns cuidados devem ser tomados. Neste caso, os moldes devem ser colocados no mesmo compartimento, onde está sendo realizado o aquecimento, para que os gases retidos nos poros sejam eliminados e não venham a provocar contaminação ou defeitos nas peças.

A escolha do tipo de forno e da atmosfera adequada, irá depender muito do metal a ser fundido. As características levadas em conta são:

- temperatura de fusão
- temperatura de vazamento
- aptidão em absorver gases
- reação com o material de cadinho
- rigidez na composição química da liga.

Nunca deve ser desconsiderada a relação do custo envolvido com a qualidade de peça e da disponibilidade de equipamentos, na indústria.

Note-se que o processo de fundição de precisão é muito versátil quanto ao tipo de forno e a atmosfera a ser usada. Entretanto, é em forno de indução ao ar que a grande maioria das peças são fundidas.

2.2.2 - MÉTODO DE VAZAMENTO DE METAIS NA FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

Os métodos de vazamento de metais empregados, na fundição de precisão, podem ser divididos em dois grupos bem distintos. Existe o grupo em que o metal é vazado dentro do molde e o preenchimento da peça se dá única e exclusivamente pela pressão metalostática, ou seja, pela ação da força da gravidade sobre o

metal líquido.

O outro caracteriza-se pela aplicação de força externa sobre o metal líquido, fornecendo assim um incremento à pressão metalostática, proporcionando o preenchimento de paredes mais finas e melhorando as propriedades mecânicas das peças.

Os métodos de vazamento pertencentes aos dois grupos citados podem ser feitos ao ar, com atmosfera controlada, usando gases protetores, ou ainda, sob vácuo, dependendo do metal e da qualidade desejada na peça.

Na tabela que segue são apresentados alguns dos métodos de vazamento mais empregados, na fundição de precisão, e os tipos de atmosfera em que estes podem ser realizados

TABELA IV - RELAÇÃO DOS TIPOS DE VAZAMENTOS USADOS EM FUNDIÇÃO DE PRECISÃO E SUA ATMOSFERA DE VAZAMENTO

MÉTODO DE VAZAMENTO	TIPO DE ATMOSFERA NO VAZAMENTO		
	AO AR	ATMOSFERA GÁS PROTETOR	VÁCUO
GRAVIDADE			
A - Panela	X		
B - Forno basculante	X	X	X
C - Forno inversão	X	X	X
D - Forno de abertura inferior	X	X	X
FORÇA EXTERNA			
A - Assistido a vácuo	X	X	X
B - Centrífugo panela	X	X	X
Centrífugo forno basculante	X	X	X
Centrífugo forno abertura inferior	X	X	X
C - Baixa pressão forno inversão	X	X	X
D - CLA	X		
CLV			X
E - FPBP	X	X	

CLA: Aspiração a vácuo com fusão ao ar. CLV: Aspiração a vácuo com fusão no vácuo. FPBP: Fundição de precisão a baixa pressão

Para melhor entendimento da tabela, seguem alguns dados e característica sobre cada método citado.

2.2.2.1 - MÉTODOS DE VAZAMENTO ONDE O PREENCHIMENTO DO MOLDE É FEITO APENAS PELA AÇÃO DA PRESSÃO METALOSTÁTICA

Estes métodos são utilizados, em grande escala, pois são de fácil execução e não necessitam de equipamentos muito sofisticados, contribuindo com isto para a diminuição do custo final das peças e, assim, formam o processo de fundição de precisão mais competitivo, no mercado de peças fundidas.

A - VAZAMENTO COM UTILIZAÇÃO DE PANELA

Este método é o mais usado e seu emprego principal é em grandes lotes de peças, pois possibilita a colocação de vários cachos enfileirados e a panela se desloca, posicionando-se sobre cada cacho, efetuando o vazamento.

O uso da panela permite dividir uma corrida, em várias panelas, e assim torna rápida a etapa do vazamento.

A utilização de panelas requer que o metal sofra um sobreaquecimento do banho, pois este irá perder calor na transferência do metal para a panela e perderá calor durante o trajeto até o local de vazamento.

Durante a transposição do metal do forno para a panela, ocorre a agitação do banho, provocando, com isso, uma maior oxidação e pode também ocorrer a absorção de gases para o interior do metal. O jorro de metal sobre o fundo da panela pode ocasionar o desprendimento da camada refratária e provocar a inclusão de partículas não metálicas nas peças.

O uso deste método de vazamento não permite um rigoroso controle da altura e do tempo de vazamento do metal, principalmente quando feito manualmente, tornando difícil de controlar os parâmetros para cada molde vazado.

Neste método, o vazamento ocorre sempre ao ar, embora o processo de fusão do metal possa ser feito tanto ao ar, sob atmosfera protetora ou mesmo sob vácuo.

B - VAZAMENTO COM O USO DE FORNO BASCULANTE

Este é um método que permite o vazamento de metal, no molde, nas três condições de atmosfera já mencionadas, ou seja: ao ar, sob atmosfera protetora ou sob vácuo.

Em princípio este método consiste em aproveitar o forno de fusão para efetuar o vazamento nos moldes. Para isso é necessário que o forno tenha um sistema que possibilite o seu basculamento e seja possível verter o metal.

Normalmente, são usados, neste método, fornos menores, visto que os cachos são pequenos e assim facilitam a operação. Como o forno só possui o movimento de basculamento, é preciso que os moldes sejam posicionados, um a um, na frente do forno.

Com a eliminação da panela de vazamento, pode-se reduzir a taxa de sobreaquecimento do metal e com isso diminuir a possibilidade de alterações da composição da liga, melhorar as características metalúrgicas e alcançar melhores propriedades mecânicas, nas peças.

Quanto ao controle da altura de vazamento, este é simples, porque ela se mantém constante, desde que sejam utilizados moldes com a mesma altura. No que se refere à velocidade, irá de-

pendar da experiência e treinamento do operador do forno.

C - VAZAMENTO USANDO FORNO COM MESA DE INVERSÃO

Os fornos com mesa de inversão são muito usados no processo de fundição de precisão. Este método permite a utilização de atmosfera com gás protetor, vácuo ou mesmo o vazamento pode ser feito ao ar.

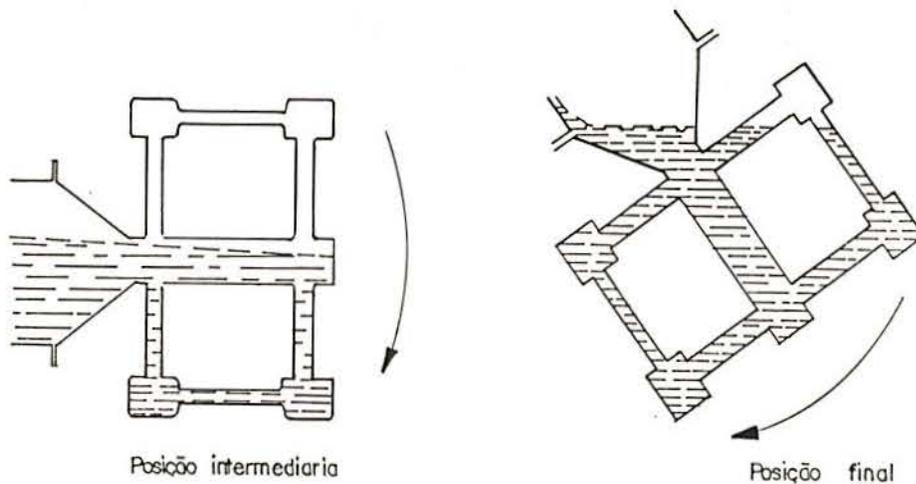


Fig. 12 - Esquema de como funciona o vazamento com forno de inversão, dando atenção para o fato do enchimento ocorrer primeiramente de um lado e depois do outro e do sentido do enchimento das peças de um lado ser contrário ao do outro lado¹⁰

São utilizados fornos de pequena capacidade, que contêm a quantidade suficiente e necessária para o enchimento do molde. Os moldes são colocados com o copo de vazamento voltado para baixo, sobre o forno, de forma a coincidir com a boca do forno.

O molde é, então, fixo à parte superior do forno, por meios mecânicos. Após completada esta etapa, inicia-se a inversão do forno, fazendo com que o metal penetre na cavidade, enchendo as peças.

Quando se opta por este método de vazamento, deve-se ter o cuidado para orientar a montagem do cacho, de tal forma, a permitir que sejam alimentadas da mesma maneira, visto que o procedimento de inversão tende a proporcionar diferente enchimento para peças colocadas em lados diferentes do canal principal.

Neste método, tem-se a garantia de eficiência do canal principal e do cone de vazamento como massalote, devido à dificuldade na troca de calor, motivada pelo calor oriundo do interior do forno sobre o copo de vazamento.

D - VAZAMENTO FEITO PELA PARTE INFERIOR DO FORNO

O metal líquido pode ser vazado por este método em atmosfera de gás protetor, ao ar ou sob vácuo, dependendo do tipo de liga usada ou da qualidade exigida para a peça.

O equipamento usado é simples e de fácil manejo. Permite um controle mais preciso das características metalúrgicas, pois o metal que enche o molde flui com menor turbulência se comparado com os métodos citados até agora.

Outra vantagem deste método sobre os anteriores é o fato do metal que enche o molde, vir do meio do banho, evitando problemas de oxidação exagerada e problemas de arraste de escória para o interior das peças. Como desvantagem, esta a possibilidade de arraste de partículas depositadas no fundo do cadinho para dentro do molde.

O equipamento consta de um forno com cadinho furado na parte inferior e com um sistema de abre e fecha para controlar o fluxo do metal. A velocidade e a altura de vazamento são de fácil controle. A altura é fixa, podendo ser regulada, dependendo do molde. A velocidade de enchimento irá depender da altura do ba-

nho dentro do cadinho e do diâmetro do orifício de vazamento.

2.2.2.2 - MÉTODOS DE VAZAMENTO COM ATUAÇÃO DE FORÇAS ADICIONAIS

Devido ao crescimento do uso do processo de fundição de precisão, houve a necessidade de melhorar as características metalúrgicas das peças e também ampliar o seu campo de aplicação. A fabricação de peças com precisão dimensional mais apurada e com paredes cada vez mais finas foram os objetivos que motivaram o desenvolvimento dos métodos de vazamento, que se valem de agentes externos para aumentar a pressão metalostática.

A pressão metalostática pode ser aumentada pela aplicação de forças como a centrífuga, que comprime o metal contra as paredes do molde, ou com aplicação de gases ou mesmo da produção de vácuo em câmaras herméticas, produzindo o mesmo efeito.

A - VAZAMENTO COM ASSISTÊNCIA A VÁCUO

Para se realizar o vazamento assistido a vácuo, é necessário colocar o molde em uma câmara que possua uma abertura na parte superior.

O molde é colocado dentro da câmara, de maneira que o copo de vazamento fique coincidindo com a abertura. Com o auxílio de placas e gachetas de amianto é feita a vedação para que se possa obter um bom nível de vácuo.

A câmara é ligada por meio de uma canalização ou mangueiras a um sistema de bombas de vácuo. Este sistema deve ser ligado momentos antes do vazamento do metal, no molde, para que forme um vácuo parcial, facilitando assim o enchimento da cavidade do molde.

Esta diferença de pressão criada, proporciona um acréscimo à pressão metalostática e facilita a saída dos gases pelas porosidades das paredes do molde, permitindo, assim, o enchimento de peças com paredes mais finas e diminuindo a taxa de sobrequecimento do metal ou a temperatura do molde. A redução destas temperaturas possibilita a obtenção de características metalúrgicas e propriedades mecânicas melhores.

Este método pode ser aplicado com o uso de painéis de vazamento, fornos basculantes, fornos para vazamento pela parte inferior e em fornos com mesa de inversão.

Apesar de se fazer uso de vácuo na câmara, o vazamento e a fusão do metal podem ser feitas em atmosferas de gás protetor ou ao ar, visto que, a região em que ocorre o vácuo é restrita entre as paredes da câmara e do molde.

A eficiência deste método irá depender muito da permeabilidade da casca e do sistema de vedação da câmara.

B - VAZAMENTO COM AJUDA DA FORÇA CENTRÍFUGA

O vazamento centrífugo se aproveita do efeito provocado pela força centrífuga, girando o molde em torno de um eixo.

O método pode ser feito de duas maneiras distintas quanto ao sistema de rotação, uma aplicável a peças grandes e outra para peças pequenas.

Para peças grandes, o eixo de rotação deve passar pelo centro da mesma e é dada preferência a peças cilíndricas. Para peças em que a parte interna é em forma de tubo, não é necessário o uso de macho. Em peças com grandes diferenças de massa de uma região para outra, é necessário um bom balanceamento do molde

sobre o dispositivo de giro para que não ocorram defeitos de enchimento.

Para pequenas peças tais como jóias e próteses dentárias existe um sistema que é constituído de um abraço que liga o local do vazamento, no centro do sistema, a um molde que é colocado na extremidade, ou seja, o eixo de rotação não passa pela peça mas sim pelo centro do copo de vazamento.

O sistema é posto em movimento e o vazamento é feito na parte central, que possui baixa velocidade tangencial, e o metal é então forçado a escoar pelo braço e encher o molde. Quanto maior for o braço maior será a velocidade tangencial e maior será a força centrífuga.

Para peças com produção industrial, os cachos são montados em forma de carrossel e o procedimento é o mesmo citado para a confecção de jóias, ou seja, várias peças girando em torno de um eixo, que passa pelo copo de vazamento, por meio de canais de ataque.

As pressões exercidas pelo metal sobre as paredes do molde podem ser elevadas e por causa disso a resistência da casca cerâmica deve ser muito bem controlada e a inspeção para detectar trincas na casca deve ser cuidadosa.

Este método de vazamento pode ser executado ao ar, com atmosfera de gás protetor ou sob vácuo. O vazamento pode ser feito com o uso de panelas, forno basculante e forno com abertura na parte inferior.

C - VAZAMENTO EM FORNO DE INVERSÃO COM APLICAÇÃO DE PRESSÃO
ADICIONAL

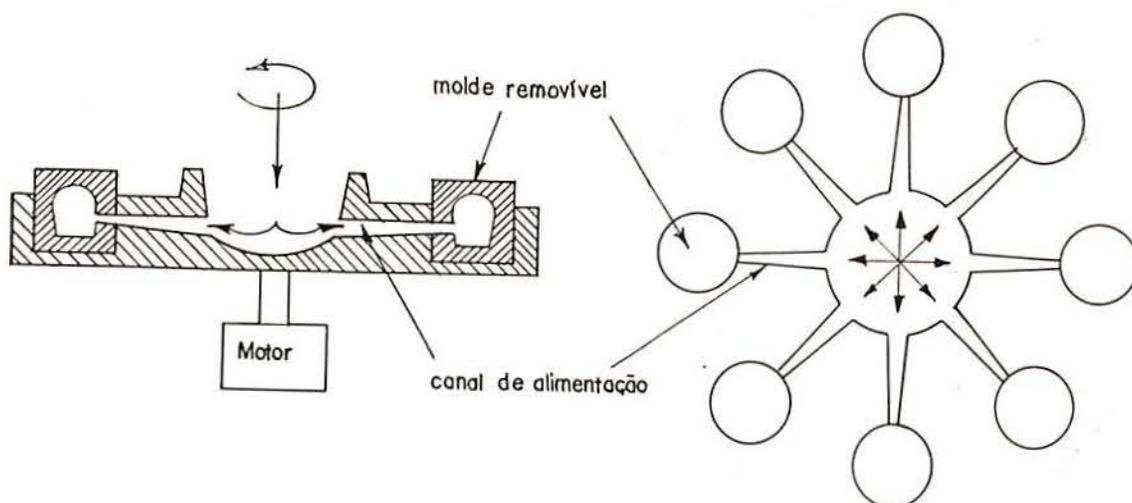


Fig. 13 - Desenho esquemático de como funciona o sistema de vazamento à força centrífuga para melhorar o enchimento das peças⁴

O vazamento realizado em forno de inversão pode receber um acréscimo à pressão metalostática se for usado um agente pressurizador no cadinho do forno.

A pressurização do sistema poderá ser feita com gás inerte, se o metal assim exigir ou poderá ser pressurizado com ar comprimido, previamente filtrado e desumidificado.

Este método permite a obtenção de peças de boa qualidade dimensional e com paredes bem mais finas do que o processo similar sem a pressurização.

A pressão aplicada poderá ser elevada, dependendo seu valor da resistência da casca cerâmica.

Os procedimentos para a execução deste método são iguais ao item 2.2.2.1C, acrescidos de uma aplicação de pressão, após a inversão do forno ter sido completa.

D - MÉTODOS DE VAZAMENTO CONTRA GRAVIDADE COM USO DE VÁCUO

Estes métodos de vazamento são conhecidos na fundição de precisão pelas letras 'C' e 'L' e são homenagens a G.D. Chandley e J.N. Lamb, criadores do método, as outras letras identificam a atmosfera em que é fundido o metal. Assim sendo, a letra 'A' é usada quando a fusão do metal se dá ao ar e 'V' quando esta ocorre no vácuo.

O método de vazamento contra gravidade é baseado em princípio muito simples, no qual a diferença de pressão entre dois recipientes é usada para fazer com que o metal líquido saia do forno e preencha o molde.

Para que o preenchimento do molde ocorra, este é colocado dentro de uma câmara com um orifício, orifício este por onde sai parte do canal principal do molde que, posteriormente, será mergulhado no banho metálico. É acoplado ainda ao sistema, um conjunto de bomba de vácuo e sistema de controle.

A câmara contendo o molde é colocado sobre o forno, com o orifício voltado para baixo e para que parte do canal principal fique mergulhado no banho.

O sistema de vácuo é então acionado e a diferença de pressão existente entre o interior da câmara e a pressão atmosférica faz com que o metal suba pelo canal principal e preencha a cavidade do molde.

A limpeza do metal vazado e a forma não turbulenta de enchimento do molde, são algumas das vantagens deste e de outros métodos de vazamento contra a gravidade.

Pelo fato do canal principal ser mergulhado no banho, o

metal que preenche a cavidade não tem contato com a atmosfera, garantindo melhores características metalúrgicas ao metal, e por ser mínima a turbulência, diminui a possibilidade de ocorrerem inclusões não metálicas.

Este método permite, ainda, o controle da velocidade de enchimento e possibilita o enchimento de paredes muito finas, com temperatura do molde e do metal mais baixas, que as normalmente usadas.

Quando o processo de solidificação das peças ocorre de forma programada, é possível aliviar o vácuo quando a solidificação dos canais de ataque estiver completa e, assim, fazendo que o metal líquido contido no canal principal, retorne ao cadinho do forno.

Este procedimento aumenta a relação entre peso de metal fundido e peso de peça pronta. (33)

O uso deste método traz melhorias nas propriedades mecânicas. Como exemplo destas melhorias podemos analisar os resultados obtidos em testes, onde são confrontados dados de peças vazadas pelo método CLA e peças vazadas usando vazamento convencional com panela. (Tabela V)

E - MÉTODO DE VAZAMENTO CONTRA GRAVIDADE COM O USO DE PRESSÃO ADICIONAL FORNECIDA POR GASES

Este método de vazamento contra a gravidade é muito semelhante ao método CLA há pouco relatado.

O equipamento e o princípio envolvido neste método de vazamento são simples e de fácil compreensão. Para que se obtenha recipientes de pressão, é necessário, neste caso, um forno

TABELA V - RELAÇÃO EXISTENTE ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS PELO PROCESSO CLA E O CONVENCIONAL PARA DIVERSAS LIGAS (34)

Liga	Método Fundição	Tensão Escoamento (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Elongação (%)	Redução da Área (%)
C356Al	convenc.	232,2	308,9	8,0	-
	CLA	251,7	341,7	14,0	-
Aço 17-4PH	convenc.	1189,7	1234,1	11,0	35,0
	CLA	1252,5	1265,0	13,5	47,0
165BeCu *	Req-min.	557,9	871,7	-	0
	CLA	829,9-948,4	1122,8-1150,7	-	7-12

* Solubilizado e envelhecido.
convec.= convencional.

hermeticamente fechado e dimensionado para resistir à pressão que será aplicada.

A tampa do forno é dotada de um tubo que fica mergulhado no metal líquido e de dois orifícios onde são conectadas duas mangueiras que vão até um quadro de comando. Por uma destas mangueiras passa o ar ou gás que será usado na pressurização e a outra servirá para descarregar a pressão do forno quando do término da operação de vazamento.

O molde aquecido é colocado sobre a tampa com o copo de vazamento virado para baixo, de maneira que este coincida com o orifício do tubo que está mergulhado no metal líquido.

Para que não ocorra perda de metal e pressão, na hora do vazamento, é necessário que o molde seja pressionado por meio de molas ou parafusos sujeitadores sobre a tampa.

Os procedimentos do método de vazamento contra gravidade com o uso de pressão de gás foi descrito, sucintamente, por Koso Yamada.

"Aplica-se uma pressão de ar ou gás dentro de um forno de maneira que a superfície do metal líquido a receba e procure a saída pelo tubo, vencendo a força da gravidade; encha o molde.

Uma vez preenchido o molde, começa a ocorrer a solidificação do metal, de forma orientada, do ponto mais afastado em direção ao canal principal, durante este período a pressão é mantida, sendo aliviada quando a solidificação estiver no canal de ataque e não ocorra mais a possibilidade de suprimento de metal líquido para a peça.

Devido ao alívio da pressão, o metal líquido que estava no canal principal, retorna ao cadinho pela ação da força da gravidade."

Apesar da aparente simplicidade do método, existem vários detalhes e procedimentos a serem estudados e definidos para que se possam obter peças de boa qualidade.

Dentre as variáveis a serem definidas para cada tipo de peça ou metal a ser vazado, estão:

- velocidade de aplicação de pressão
- tempo de solidificação
- tipo de gás a ser usado
- altura total de subida do metal
- temperatura do banho
- temperatura do molde
- permeabilidade do molde
- resistência do molde
- pressão máxima aplicada
- material do tubo

Dois fatores importantes dentre os citados são a solidificação direcional e a suavidade na aplicação da pressão.

A solidificação direcional é fundamental, para que não ocorram cavidades de contração em pontos isolados da peça, para que seja possível o retorno do metal líquido ao forno, sem provocar defeitos nas peças e se obtenham estruturas metalúrgicas sãs.

A suavidade na aplicação da pressão é importante, pois é aconselhável que não ocorram turbulências, no fluxo do metal, porque estas favorecem a oxidação e podem provocar o envolvimento de bolhas de gás pelo metal líquido.

A fundição de precisão, usando como método de vazamento a baixa pressão (FPBP), pode utilizar como elemento pressurizador

o ar comprimido limpo e desumidificado ou gases inertes ao metal fundido.

O valor da pressão a ser usada, pode ser calculado teoricamente a partir da altura da coluna de metal desde a superfície do banho até a parte mais alta do molde a ser preenchido.

A equação IV^{(36) (37)} permite calcular a pressão necessária para que o metal atinja a parte mais elevada:

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (\text{IV})$$

onde

h = altura entre a superfície do banho e a parte mais alta do molde

P_1 = pressão aplicada para elevar o metal

P_2 = pressão na superfície do metal dentro do molde, normalmente é a pressão atmosférica

ΔP = pressão lida no manômetro

ρ = densidade do metal líquido

Recomenda-se a aplicação de uma pressão adicional a esta calculada para compensar a perda de carga devido ao atrito do metal com as paredes do molde, para compensar as possíveis perdas por vazamento, no sistema de vedação, e para superar a contra pressão criada pela maior ou menor facilidade na expulsão do ar através das paredes do molde.

A pressão aplicada sobre o metal, além de favorecer o preenchimento de paredes mais finas, atua, também, sobre a transferência de calor metal molde, no sentido de diminuir a resistência térmica, fato este possível, pois a pressão retarda a formação do gap de ar.⁽³⁸⁾

A velocidade com que é aplicada a pressão no interior do forno é importante, pois ela poderá provocar turbulências no banho; para que isso não ocorra, a aplicação da pressão deve ser de forma constante, sem pulsações e regulada por equipamentos com controles precisos e finos.

Normalmente a velocidade de aplicação está dentro da faixa de 0,005 a 0,030 kgf/cm⁽³⁹⁾ por segundo.

Usando-se a equação de Bernoulli e do teorema de Torricelli, é possível calcular a velocidade do fluxo do metal dentro do tubo de subida e no canal principal, sem esquecer que o fluxo do metal, neste caso, tem sentido contrário à força da gravidade.

Assim, com a equação $v^{(40)}$, pode-se fazer o cálculo da velocidade de enchimento do molde.

$$v = \sqrt{2g \left[\left| \frac{P_1 - P_2}{\rho} \right| - h \right]} \quad (V)$$

onde

v - velocidade de enchimento do molde

P_1 = Pressão aplicada no interior do forno

P_2 = pressão dentro do molde, normalmente
pressão atmosférica

h = altura do banho até o ponto mais alto do
molde

g = aceleração da gravidade

ρ = densidade do metal líquido

Quando a pressão é aliviada para que o restante do metal líquido volte ao cadinho do forno, o alívio deve ser lento para que não haja turbulência, no fluxo de retorno, e não ocorra o revolvimento de partículas do fundo do cadinho e a formação excessiva de óxidos.

É recomendado que o volume de metal que retorna ao cadinho, não exceda a 25% ⁽⁵⁵⁾ do volume que ficou no cadinho. Caso este valor seja maior poderá provocar o envolvimento de óxidos flutuantes para dentro do banho.

Das peças do equipamento envolvido, neste método, sem dúvida, a que mais cuidado exige é o tubo que fica mergulhado no e por onde o metal sobe para atingir o molde.

O tubo é, constantemente, mergulhado no banho a altas temperaturas e a cada vez que o metal é forçado a subir para encher o molde, este sofre forte lavagem. Por estes e outros motivos, o material do tubo é de grande importância.

Os materiais usados para a confecção dos tubos devem ter:

- boa resistência ao impacto causado pelo manuseio inadequado
- boa resistência ao desgaste
- resistência ao choque térmico
- boa estanqueidade
- boa resistência à oxidação
- ser inerte ao banho.

O material mais usado é o ferro fundido, apesar de ser pouco indicado para ligas à base de alumínio, pois se desgasta facilmente e contamina o banho, provocando a deterioração da resistência mecânica das ligas.

Para retardar o desgaste e diminuir a contaminação, usa-se uma tinta à base de óxido de zircônio sobre uma base âncora de fibra de vidro. ⁽³⁹⁾

O grafite é outro material usado para a confecção de tubos porque é capaz de resistir a altas temperaturas e não conta-

mina o alumínio. Seu uso é pequeno porque é um material pouco estanque e com a aplicação da pressão, metais, como o alumínio, são capazes de atravessar as paredes através dos microporos. Em alguns casos, o próprio gás usado para pressurizar o forno escapa pelos poros e não produz a pressão necessária para que o metal suba.

Outra alternativa encontrada é a utilização de tubos esmaltados. Sua maior desvantagem é a baixa resistência ao choque térmico e sua baixa resistência ao impacto, necessitando grande cuidado no manuseio.

Tubos de alumina também podem ser usados, porém têm baixa resistência ao choque térmico e devem ser preaquecidos antes de mergulhados no banho. Outra desvantagem é a sua baixa resistência ao ataque da escória, principalmente de aços. A escória ataca o tubo e provoca sua ruptura, na altura do banho. (41)

Os processos de vazamento contra gravidade aplicados à fundição de precisão têm algumas vantagens sobre outros métodos:

- A possibilidade de agrupar um maior número de peças numa única árvore, pois não é necessário deixar grandes espaços entre as peças para que as ferramentas de corte entrem para efetuar a separação das peças do canal principal. Este agrupamento também reflete na diminuição dos custos, pois diminui o emprego de mão de obra para efetuar esta operação e diminui os custos inerentes à refusão do metal do canal e copo de vazamento.
- Podem ser usadas temperaturas mais baixas para o metal líquido, pois não há perda de calor na hora de verter o metal no molde.
- Possibilitam o uso de pressões de enchimento elevadas, permitindo a obtenção de peças com paredes bem finas

- Fornecem um rendimento entre o peso do metal da peça pronta e o peso do metal fundido de 80 a 90%. (41)
- Permitem um controle efetivo da velocidade de enchimento e da temperatura do banho mais constante.
- Proporcionam o enchimento das peças com metal mais limpo, pois este é proveniente da sub-superfície do banho.
- Possuem grande potencial para serem automatizados.
- Proporcionam peças sãs devido à solidificação orientada e uma melhor qualidade metalúrgica às peças.

Alguns cuidados devem ser tomados quanto à resistência da casca, pois esta irá sofrer pressões bem mais elevadas do que em outros métodos. Outro item que deve ser controlado é a permeabilização do molde, pois grande parte do bom desempenho do método está ligado a esta característica.

As semelhanças entre este método e o método CLA são grandes e permitem, em alguns casos, que parâmetros e dados de um sirvam para outro.

Uma vantagem deste método sobre o CLA é a possibilidade da aplicação de pressões com valores acima de $1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$, que é o limite máximo para o processo que usa vácuo, mas, em contra partida, o processo CLA proporciona o enchimento do molde de forma mais uniforme e menos turbulenta que o método que utiliza gás para pressurizar o forno.

2.3 - METAIS E LIGAS USADAS EM FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

O processo de fundição de precisão tem, como uma de suas

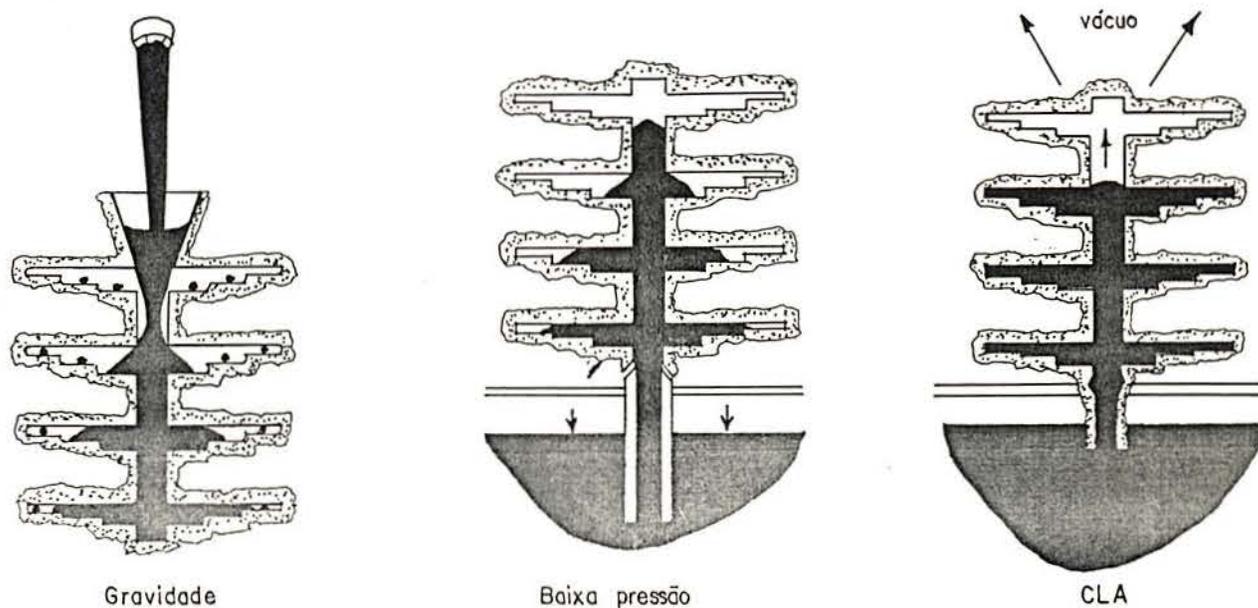


Fig. 14 - Desenho comparativo de como se dá o enchimento de cachos, usando três tipos de vazamento. Da esquerda para a direita: vazamento convencional ao ar, vazamento contra a gravidade utilizando baixa pressão sobre o banho e vazamento contra gravidade usando vácuo³⁴

principais vantagens, a possibilidade de produzir peças com qualquer tipo de metal ou liga, possíveis de serem fundidas.

Para a utilização do processo com metais com alguma peculiaridade, basta que sejam feitas alterações no que diz respeito ao material refratário ou ao ligante usado, ou, ainda, alguma mudança nas operações de revestimento do modelo.

Partindo deste princípio, a seleção da liga mais adequada e econômica para determinada peça, parte de uma gama enorme de opções. Assim, há de se considerar cada uma das característi-

cas da peça para se fazer uma escolha apropriada.

Características como: resistência mecânica, dureza, resistência a impacto, resistência à corrosão química, resistência à oxidação, resistência a altas temperaturas e várias outras que servem de base para o projetista definir a liga adequada.

Pode-se exemplificar a flexibilidade do processo, mostrando algumas alterações feitas, no processo convencional, para que seja possível a produção de peças com ligas de titânio.

Para peças onde o emprego de ligas à base de titânio é recomendado, alguns cuidados devem ser tomados.

Devido à alta reatividade do titânio e sua alta temperatura de fusão, é indicado, para a formação da primeira camada, o uso de lama e estudo à base de grafite artificial ou óxidos sólidos, resistentes a altas temperaturas, tais como: Th O_2 , $\text{Y}_2 \text{O}_3$, CaO , ou ainda com pó de metais de alto ponto de fusão e óxidos aglomerantes.⁽²¹⁾

Estes materiais suportam as altas temperaturas das ligas de titânio e reduzem bastante a contaminação da peça, formando ainda uma fina camada cementada que é indesejada. Contando com este inconveniente, o projetista deve prever uma sobremedida no modelo de cera, para que, posteriormente, esta camada cementada seja retirada em um banho ácido que ataque a liga.⁽⁴³⁾

Dentre os metais mais usados na fundição de precisão encontram-se:

- aços comuns e especiais
- aços ferramenta
- aços inox.
- alumínio e suas ligas

- cobre e suas ligas
- ligas à base de titânio
- ligas à base de magnésio
- ligas à base de cobalto
- ligas à base de níquel

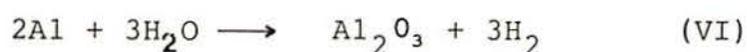
2.3.1 - ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio comercialmente puro é pouco utilizado para a produção de peças fundidas, porque possui baixa resistência mecânica, ou seja, é muito malheável e ductil (alongamento $\approx 40\%$), possui baixa resistência à tração (5 a 9kgf/mm²), baixo limite elástico e baixa dureza (17 a 20 HB),

O alumínio caracteriza-se por possuir uma grande tendência à formação do óxido de alumínio, conhecido como alumina (Al₂O₃), que é muito estável. A camada de alumina que se forma sobre o banho é compacta e bastante aderente. Em casos de rompimento nesta camada, uma nova camada de óxido irá se formar imediatamente. O teor de umidade do ar ou a umidade contida, na carga do forno, são elementos que provocam a oxidação do alumínio.

A velocidade de oxidação do alumínio é grande, quase instantânea. Quando o metal está no estado líquido, esta rápida oxidação é a explicação das explosões que ocorrem quando da adição de sucata ou ferramentas úmidas, no banho.

A equação VI⁽⁴⁵⁾ a seguir, mostra como a reação ocorre:



O hidrogênio que é liberado como subproduto da oxidação,

é dissolvido rapidamente pelo alumínio líquido que possui grande afinidade com este gás.

Quando da solidificação do alumínio, este hidrogênio se desprende e, por consequência, produz porosidades nas peças. A solubilidade do hidrogênio aumenta com o aumento da temperatura e é proporcional à raiz quadrada da pressão. (45)

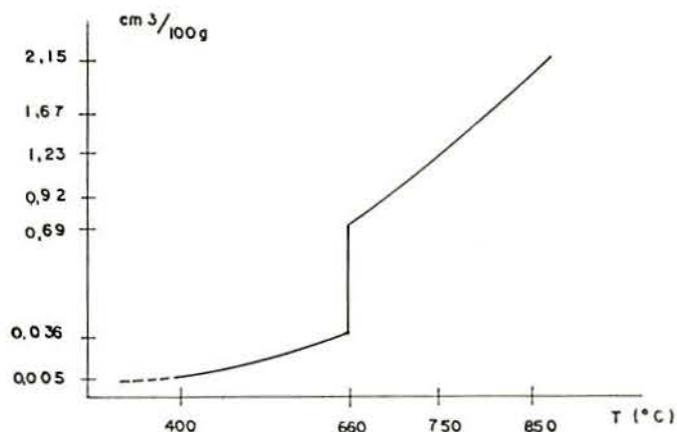


Fig. 15 - Gráfico do aumento da solubilidade do hidrogênio no alumínio em função da temperatura ⁹

O grande emprego do alumínio se dá pelo uso das ligas. A introdução de elementos de liga provocam melhorias nas características de fundição do alumínio e melhoram as propriedades mecânicas. Os elementos mais usados e que produzem melhores resultados quando adicionados em quantidades pré determinadas, ao alumínio, são: silício, cobre, magnésio, zinco, titânio, níquel, manganês, cromo e estanho.

- Silício (Si) - é o elemento largamente usado nas ligas de fundição. É normalmente adicionado até 13% em peso e sua adição visa aumentar a fluidez do alumínio líquido, permitindo o preen-

chimento de paredes delgadas e reproduzindo detalhes delicados. O silício ainda reduz a contração, melhora a estanqueidade, melhora a soldabilidade e produz excelente resistência à corrosão, até mesmo para alguns ácidos fracos.

A adição de pequenas quantidades de magnésio às ligas de alumínio e silício faz com que estas sejam tratáveis termicamente e possam melhorar ainda mais suas propriedades mecânicas.

O silício em altos teores provoca dificuldades nas operações de usinagem posteriores. Estas ligas de alto teor de silício podem sofrer um tratamento de modificação com sódio. Esta modificação baseia-se na adição de sódio líquido ao banho, para que provoque uma fina dispersão do silício e grandes alterações nas características estruturais e, por conseguinte, melhorias nas propriedades mecânicas. Este tratamento foi descoberto, em 1920, por Alader Pacz. (46)

- Cobre (Cu) - É um dos principais constituintes endurecedores do alumínio fundido e serve para aumentar a resistência mecânica, diminuir a contração e melhorar as características de usinabilidade.

Ligas com cobre podem sofrer corrosão devido a reações galvânicas entre a matriz de alumínio e as partículas ricas em cobre, quando estiverem em ambientes úmidos ou sob atmosfera salina.

- Magnésio (Mg) - O magnésio como elemento de liga se comporta como endurecedor da mesma forma que o cobre, se adicionado acima de 8% em peso. Em teores inferiores necessita da presença de outro elemento, como silício, para que possa responder ao tratamento térmico.

O magnésio torna mais difícil a fundição devido à sua grande tendência à oxidação. Ligas à base de magnésio são muito leves e também apresentam a melhor combinação de propriedades mecânicas com usinabilidade, resistência à corrosão e boa anodização. Esta liga não é indicada para peças com desenhos complexos e que exigem estanqueidade, pois são ligas que possuem uma estreita zona de solidificação.

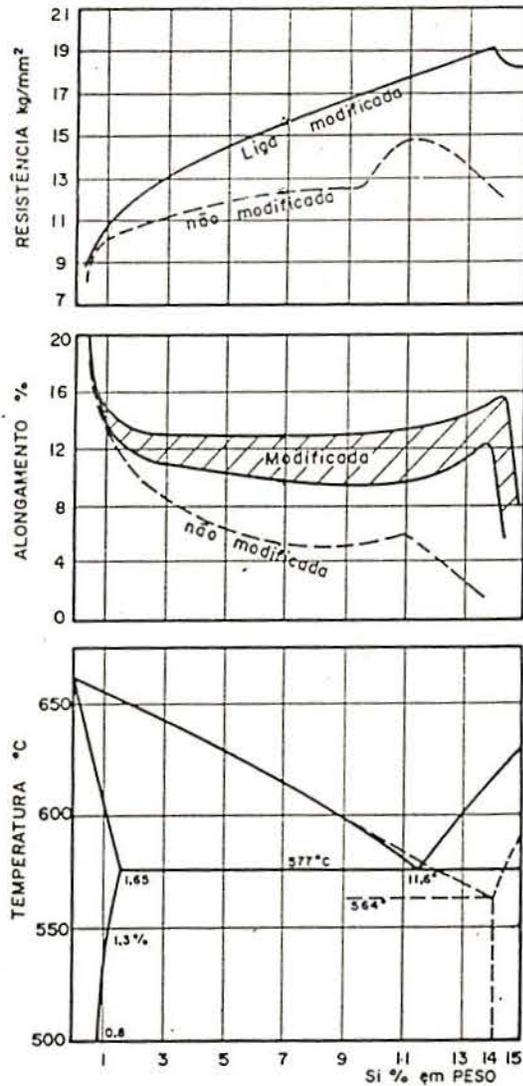


Fig. 16 - Gráficos que mostram as melhorias nas propriedades mecânicas devido ao tratamento de modificação por sódio e também os efeitos sobre o diagrama de fases motivados pela adição de sódio nas ligas alumínio silício⁴⁰

2.3.1.1 - LIGAS DE ALUMÍNIO SILÍCIO

Devido às excelentes características de fundição das ligas de alumínio e silício, estas são as ligas comercialmente mais importantes e mais usadas.

As ligas binárias não são tratáveis termicamente e o silício provoca um efeito endurecedor inferior aos conseguidos pelo cobre. A liga binária contendo 5% de silício, em peso, é usada para peças que necessitam boa ductilidade, boa resistência à corrosão e estanqueidade. São indicadas para a fabricação de utensílios de cozinha, armações marítimas e em peças com paredes finas.

As ligas contendo 12% de silício, em peso, apresentam maior fluidez além de boa resistência à corrosão e são usadas em peças com paredes finas e intrincadas.

A adição de outros elementos à liga binária faz com que estas adquiram melhores propriedades mecânicas, sem alterar as boas características de fundição.

A adição de cobre visa aumentar a resistência mecânica e melhorar a usinabilidade, porém, causa uma diminuição na resistência à corrosão e ductilidade. Ligas com baixos teores de silício e cobre são usadas para a fabricação de coletores e corpos de válvulas.

A liga 319 (3% de Cu e 6% de Si) apresenta boas propriedades de fundição e as peças obtidas apresentam propriedades mecânicas estáveis. Esta liga é usada na fabricação de grades ornamentais, refletores, cabeçotes e carters de motores de combustão interna e para estrutura de máquinas de escrever.

A adição de magnésio às ligas de alumínio-silício propiciam a estas, propriedades mecânicas semelhantes às das ligas alumínio-cobre, além de apresentar melhor resistência à corrosão, menor densidade e melhores características de fundição. (41)

Dentre as ligas de alumínio-silício-magnésio, a liga 356 é uma das melhores sob o ponto de vistas das propriedades de fundição. Esta é aplicável à produção de bombas para aviões, carcaças de câmbio, armações de aviões e blocos de motores de combustão interna refrigerados a água.

A combinação do magnésio e do silício apresenta importante efeito, pois pode formar um composto intermediário Mg_2Si que origina um sistema quase binário com o alumínio, semelhante ao sistema alumínio-cobre. O Mg_2Si é uma fase endurecedora mais poderosa que a $Cu Al_2$ com a vantagem de não afetar a resistência à corrosão (49).

Outros elementos de liga, menos comuns, podem ser usados nas ligas alumínio-silício. O níquel é um destes elementos e é usado em ligas que são elaboradas para a fabricação de pistões para motores de combustão interna. Os pistões devem possuir baixo coeficiente de dilatação térmica, baixo peso específico, elevada condutividade térmica, alta resistência ao desgaste e manter boas propriedades, em temperaturas elevadas.

Para satisfazer todas estas condições, são usadas ligas com altos teores de silício com adição de cobre, magnésio e níquel. A liga 332.2 (12% Si, 1% Cu, 1% Mg e 2% Ni) é uma das ligas usadas pela indústria automobilística.

As ligas à base de silício podem ainda ser tratadas por modificação para melhorar as propriedades mecânicas.

O tratamento de modificação consiste na adição de uma pequena percentagem de sódio líquido ao banho, na panela ou forno basculante. O sódio promove mudanças na morfologia do eutético e observa-se uma apreciável redução no tamanho dos cristais e do seu arredondamento, visto que o silício primário se deposita em forma de lâminas ou agulhas, se este tratamento não for usado.

A modificação provocada pela adição do sódio consiste em um refino microestrutural que, associado a uma maior dispersão do silício, provoca o endurecimento estrutural, causando o aumento da resistência à tração e a melhoria da ductilidade. ⁽⁵⁰⁾

2.3.1.1.1 - LIGA 356 (Al-7% de Si- 0,3% Mg)

A liga 356 admite a seguinte composição química da tabela VI

TABELA VI - COMPONENTES ENCONTRADOS NA LIGA 356 E SUAS VARIAÇÕES PERMITIDAS ⁽⁹⁾

COMPONENTES	PERCENTAGEM EM PESO
Si	6,5 a 7,5
Mg	0,2 a 0,4
Fe	0,5 Max
Ti	0,2 Max
Cu	0,2 Max
Pb	0,05 Max
Sn	0,05 Max
Al	Restante

O número 356, que designa a liga, segue as normas da "Aluminum Associations" (AA), para identificação.

A nomenclatura da AA é feita com quatro algarismos sendo dispostos da seguinte maneira: três algarismos, um ponto, mais um

algarismo (xxx.x).

O algarismo que vem após o ponto serve para indicar a rigidez, na composição química. Cada número representa uma condição específica. O zero (xxx.0) significa que a peça deverá estar dentro da composição especificada. O número um (xxx.1) indica que é o lingote que deverá ter a composição especificada. Se o número for dois (xxx.2), significa que a composição do lingote deve ser mais rígida que a anterior com respeito a algumas impurezas.

No que diz respeito aos três algarismos que precedem o ponto, o primeiro indica qual o elemento base da liga. Como exemplo, o número um (1xx.x) indica ligas puras, o número dois (2xx.x) indica ligas à base de cobre, o número três (3xx.x) indica ligas à base de silício, e assim por diante. Os dois números restantes servem para identificar a liga dentro do grupo a que pertence e são aleatórios, não seguindo a uma regra específica.

A liga 356 é usada em peças onde se requer média resistência mecânica e boa resistência à corrosão. A liga se caracteriza por ser tratável termicamente e admitir o tratamento de modificação por sódio.

Os resultados obtidos com os dois tipos de tratamento são praticamente os mesmos. Não é aconselhado aplicar o tratamento térmico após o de modificação, porque este eliminaria as melhorias obtidas e passaria a ter os benefícios só do tratamento térmico.

Na Tabela VII aparecem algumas propriedades mecânicas da liga 356.

TABELA VII - VALORES PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DA LIGA 356 QUANDO TRATADA TERMICA-
MENTE (46)

Liga e Estado A.A.	Resistência Limite (*) kg/mm ²	Limite (%) Escoamento kg/mm ²	Alongamento % em 50 mm	Dureza Brinell 10mm/500kg	Limite Fadiga (**) kg/mm ²
356.0-T51	17,5	14,0	2,0	60	5,5
-T6	23,0	17,0	3,5	70	6,0
-T7	24,0	21,0	2	75	6,5
-T71	19,5	15,0	3,5	60	6,0
356.0-T6	27,0	19,0	5	80	9,0
(***)-T7	22,5	17,0	5	70	8,0

Observação: (*) Resistência limite e limite de escoamento à tração. O corpo de prova é padrão com 12,7 mm diâmetro fundido em areia individualmente. A resistência à compressão é igual ou ligeiramente maior.

(**) Ensaio a 500.000.000 de ciclos.

(***) corpo de prova em molde permanente.

A variação do conteúdo do silício, na liga, produz pequena variação na resistência à tração. O teor de silício na liga provoca uma redução da temperatura 'liquidus', o que propicia o aparecimento de grande quantidade de eutético, na microestrutura da liga.⁽⁵²⁾ O aumento das propriedades depende da quantidade de magnésio presente. Com o magnésio, em torno de 0,3%, e variação de silício, entre 6,5 e 7,5%, tem pouco efeito sobre o limite de elasticidade, resistência à tração e um leve efeito na alongação.

No que diz respeito à adição de magnésio, este permite uma grande variação no limite de elasticidade, resistência à tração e uma limitação nos valores de alongação.

A fim de associar a resistência mecânica à ductilidade é necessário limitar o uso do magnésio a 0,4%.

A extrema sensibilidade da liga 356 ao conteúdo de mag-

nésio deve-se ao fato do limite de solubilidade sólida da liga. Adições acima de 0,3% produzem Mg_2Si em quantidade que se aproxima do limite de solubilidade sólida.

Na liga 356 o ferro é considerado impureza e provoca um abaixamento das propriedades mecânicas e aumenta a fragilização devido à formação de um composto Al_3Fe , em forma de agulhas que dificulta a usinabilidade das peças.

A presença de ferro de 0,25% a 0,5%, melhora as propriedades da fundição da liga e em teores acima destes, provoca a formação de rechupes.

O titânio presente na liga tem como finalidade aumentar as propriedades mecânicas, diminuir a formação de trincas, melhorar o aspecto superficial após o polimento e diminuir a condutividade térmica.

Teores elevados de titânio, acima de 0,3%, formam o composto $TiAl_3$, na forma de cristais primários que são muito duros e frágeis.

O cobre serve para melhorar a usinabilidade da liga e em teores acima do especificado, diminui a resistência à corrosão e pode aumentar a tendência à fragilidade a quente.

O estanho, como impureza, tende a endurecer a liga, mas, em presença do cobre, sua ação não é sensível.

A liga 356 é tratável termicamente e os tratamentos possíveis são:

T5 = envelhecimento artificial

T6 = solubilização e envelhecimento artificial

T7 = solubilização e estabilização

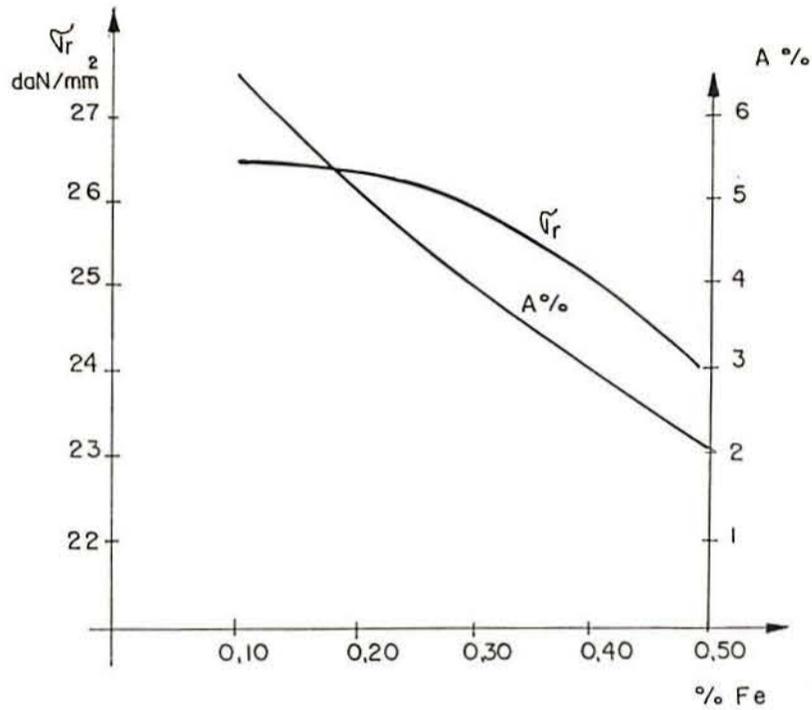


Fig. 17 - O gráfico mostra os efeitos provocados sobre a resistência à tração e ao alongamento pela contaminação de ferro em ligas de alumínio 356⁽⁴⁵⁾

O tratamento térmico mais usado na liga 356 é o tratamento T6 e consiste em aquecer a peça a uma temperatura próxima da temperatura do ponto eutético e permanecer por um determinado tempo a esta temperatura para que ocorra a solubilização. A solubilização serve para dissolver os constituintes e formar uma solução sólida. A solubilização é seguida de resfriamento rápido para formar uma solução sólida supersaturada a temperatura ambiente.

A próxima etapa é a precipitação, que consta em aquecer

a uma determinada temperatura para que ocorra o endurecimento por precipitação.

No preparo da liga ou na refusão de lingotes são necessários alguns cuidados para que a liga não absorva hidrogênio, que durante a solidificação, propiciaria o aparecimento de porosidades.

Recomenda-se que o banho não ultrapasse a 700°C e que seja usado cloro ou nitrogênio para a desgaseificação da liga. Desgaseificação com cloro pode causar perda no teor de magnésio.

2.4 - TRATAMENTO TÉRMICO DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O método mais comum de se alterar as microestruturas é através dos vários tipos de tratamentos térmicos. Dentre os inúmeros métodos de tratamentos térmicos existentes, os que mais se aplicam ao alumínio e suas ligas são:

- alívio de tensões ou estabilização
- recozimento para recristalização e ou homogeneização
- solubilização
- precipitação ou envelhecimento
- superenvelhecimento e coalescimento

O tratamento das peças de alumínio requer rigorosos controles de aquecimento e resfriamento. Cada fase do processo é considerada crítica no que diz respeito a posteriores aplicações das peças.

O propósito principal dos tratamentos térmicos, nas peças de alumínio, é desenvolver uma melhor combinação de propriedades mecânicas e:

- desenvolver uma estrutura uniforme em toda a peça
- remover as tensões internas causadas pela contração durante a solidificação do metal ou por tensões provocadas por soldagem e usinagem
- promover a estabilidade dimensional
- melhorar a usinabilidade
- melhorar a resistência à corrosão.

2.4.1 - ALÍVIO DE TENSÕES E ESTABILIZAÇÃO

Este tratamento térmico é usado para aliviar as tensões internas das peças, provocadas pela solidificação do metal ou por qualquer outro processo aplicado sobre a peça, durante sua manufatura.

O alívio de tensões é muito aplicado em peças destinadas à indústria aeronáutica. Este tratamento térmico é feito a uma temperatura por volta de 205 a 260°C, durante um período de 4 a 6 horas, dependendo estes valores do tipo de liga usado.

2.4.2 - RECOZIMENTO PARA RECRISTALIZAÇÃO E OU HOMOGENEIZAÇÃO

O tratamento de recristalização para as ligas de alumínio laminadas ou forjadas e o tratamento de homogeneização para peças fundidas⁽⁴⁴⁾ é feito aquecendo-se a peça a uma temperatura em torno de 300 a 400°C, que provocará uma recristalização quase que instantânea e a seguir um resfriamento lento, ao forno, até 250°C e depois é retirada do forno e deixada ao ar até a temperatura ambiente.

Este tratamento térmico dá bons resultados quanto à ductilidade nas peças tratadas.

Para a realização do recozimento é indicado o uso de fornos de resistência elétrica com circulação de ar forçado, ou fornos com banho de sais fundidos, pois estes dois tipos mantêm uniforme a temperatura, no seu interior, garantindo o perfeito recozimento.

É indicado o uso de temperaturas mais baixas, no tratamento de peças que foram submetidas a grandes taxas de encruamento.

O aquecimento para algumas ligas deve ser de aproximadamente 50 a 100°C abaixo da temperatura eutética ou peritética para evitar que em locais de zonamento estrutural, da segregação interdentrítica, de eutéticos e peritéticos concentrados, ou nas áreas intergranulares, que ocorra a fusão parcial, a oxidação destas zonas, tornando a liga "queimada",⁽⁴⁴⁾ ou seja, com propriedades mecânicas bem abaixo das esperadas.

A homogeneização ocorre devido ao processo de difusão, com boa dissolução dos microconstituintes, resultando a uniformidade química e a boa distribuição das fases presentes.

2.4.3 - SOLUBILIZAÇÃO

A solubilização é um tratamento térmico, cíclico e preliminar, que visa dissolver totalmente as fases microscópicas, simples ou intermediária, presentes na matriz de uma liga, pelo aquecimento ao campo monofásico inerente à liga.

Logo após, a peça é resfriada rapidamente até a temperatura ambiente para manter o estado monofásico, mesmo que este não seja seu estado normal.

A solubilização aumenta rapidamente com o aumento da tem-

peratura. Deve-se ter cuidados, especialmente, para que a temperatura não chegue muito próximo da temperatura eutética ou peritética, para que não ocorram problemas como os citados no item 2.4.2.

Os processos de solução e homogeneização são muito dependentes da difusão, que é um processo lento. O tempo requerido para o tratamento de solução depende muito da espessura da peça, da liga usada, da taxa de solidificação e, também, são estes fatores que determinarão o tamanho e a distribuição da fase precipitada quando do próximo tratamento.

Seções maciças, lentamente resfriadas, exigem constituintes grosseiros e tamanho granular maior, nos quais a difusão se torna mais lenta. Em seções finas motivadas pelo rápido resfriamento, os constituintes são mais finos, as distâncias de difusão são menores e o tempo requerido menor.

O tempo do tratamento de solução passa a ser contado a partir do momento em que toda a carga atinja a temperatura especificada pelas normas técnicas.

O tempo de permanência da carga, no forno, para que a solução atinja os níveis desejados depende ainda:

- das características físico-químicas das fases presentes
- da quantidade e do grau de dispersão
- dos processos pelos quais a peça foi submetida anteriormente
- da própria temperatura, pois existem alguns casos em que a oscilação não pode ultrapassar mais ou menos 5°C

2.4.4 - PRECIPITAÇÃO OU ENVELHECIMENTO

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

Para a realização do tratamento térmico de precipitação é necessário um tratamento de solução, seguido de tempera, ou a partir do resfriamento de peças fundidas ou estrudadas, para que forme uma solução sólida supersaturada.

O envelhecimento começa com o reaquecimento da peça a uma temperatura intermediária, na qual a precipitação se inicia.

Um bom exemplo da utilização do tratamento de envelhecimento é o uso na construção de aviões.

Os rebites feitos de alumínio são fáceis de colocar e se ajustam melhor se forem moles e ducteis; entretanto, nesta condição, não possuem a resistência necessária. Para resolver este problema, utiliza-se uma liga de alumínio que forme solução sólida supersaturada ao ser resfriada bruscamente, após a solubilização, quando é feito o processo de rebitagem das chapas e depois envelhece sem precisar ser aquecida, ou seja, envelhece a temperatura ambiente.

Quando o tratamento de envelhecimento é aplicado, os constituintes dissolvidos precipitam na forma mais fina e mais distorcida que a existente originalmente. As partículas são muito pequenas e não são visíveis, em microscópios ópticos.

Em casos onde o precipitado aparece visível no microscópio óptico é sinal de que ocorreu o superenvelhecimento, onde o precipitado se encontra na forma incoerente com a matriz do alumínio, provocando a diminuição da dureza.

2.4.5 - MECANISMO DE ENDURECIMENTO

Para o melhor entendimento do mecanismo de endurecimento

por precipitação, é preciso que sejam dadas algumas considerações sobre o mecanismo de deformação.

As deformações ocorrem, preferencialmente, ao longo de planos definidos dentro do reticulado cristalino. A ductilidade de um metal depende de sua capacidade para deslizar nestes planos.

As deformações de um grão ocorrem ao longo do plano de deslizamento, conforme pode ser visto na figura 18⁽⁹⁾ a seguir.

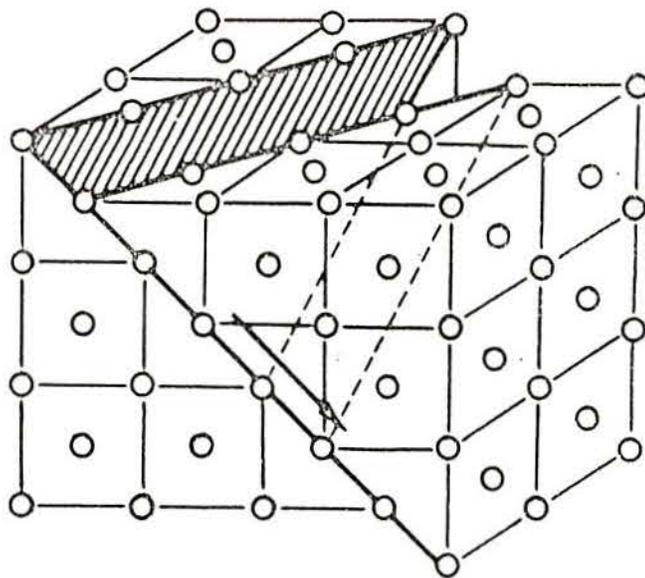


Fig. 18 - Esquema que mostra como ocorre a deformação em ligas de alumínio, seguindo planos diagonais diferenciais⁽⁹⁾

A resistência ao deslizamento destes planos determina a tensão de ruptura do metal. Entretanto, esforços para aumentar a resistência do metal estão direcionados ao aumento da resistência relativa ao movimento, ao longo dos planos normais de deslizamento.

No tratamento térmico ocorre primeiro a formação de uma

solução sólida supersaturada, que depois será precipitada sob condições controladas, para desenvolver partículas precipitadas de um tamanho e distribuição que venham a produzir o maior efeito de reforço.

O que realmente ocorre, durante o envelhecimento, foi visto em 1938⁽⁵⁴⁾ por dois pesquisadores, Guinier e Preston, quando detectaram, pela primeira vez, este precipitado, usando uma técnica especial de raio X.

Devido a isto estas estruturas, em fase inicial de precipitação, são conhecidas como zonas de Guinier-Preston (GP).⁽⁵⁵⁾

O envelhecimento ocorre em três fases distintas e são conhecidas como GP1, GP2 e estrutura totalmente precipitada.

As partículas nas fases GP1 e GP2 não são vistas em microscópios ópticos, pois possuem poucos angstroms de espessura e aproximadamente 100\AA de diâmetro e comprimento para ligas à base de cobre.⁽⁴⁴⁾

A teoria de reticulado coerente é a mais usada para explicar o endurecimento por precipitação. De acordo com esta teoria, a primeira fase da precipitação ocorre devido à segregação de átomos de soluto sob a forma de agregados ou plaquetas, no reticulado cristalino da matriz. Estas zonas ricas em soluto são chamadas GP1⁽⁵⁶⁾. Este agrupamento pode produzir deformações localizadas, de maneira que a dureza da GP1 é maior que a dureza da solução sólida.

Com a continuação do processo de envelhecimento, a segregação continua e a GP1 tende a formar seu reticulado cristalino, que ainda possui coerência com o reticulado da matriz, na qual se precipita, passando a formar as zonas GP2.

A GP2 se ajusta normalmente em duas direções com a célula unitária do alumínio mas não na terceira, provocando distorções no plano $(1,0,0)$ ⁽⁴⁴⁾ ⁽⁵⁵⁾ para que a coerência seja mantida.

Estas distorções provocam um tratamento dos planos de deslizamento da matriz, aumentando assim sua resistência, ou seja, a tensão de ruptura.

Prosseguindo o envelhecimento, a GP2 passa a não mais formar um precipitado coerente com a matriz, mas sim, um precipitado de equilíbrio, com reticulado cristalino próprio, em consequência a dureza diminui e a partícula passa a ser visível, no microscópio óptico.

A liga, ao atingir este estágio, passa a ser chamada de superenvelhecida e os precipitados se alinham ao longo dos planos cristalográficos, resultando em interessantes figuras geométricas. Estas formações são conhecidas como estruturas de Widmanstätten.

Durante o processo de envelhecimento o precipitado produzido pode ser:

- coerente - quando existe uma correspondência um-a-um entre os reticulados do precipitado e da matriz;
- semi-coerente - quando existe somente uma correspondência parcial de planos do reticulado e as discordâncias formam-se com posições de não correspondência;
- incoerente - quando há inexistência de correspondência entre dois reticulados.

Na tabela VIII estão alguns dos metais que podem ser en-

durecidos por precipitação e seus sistemas de envelhecimento.

TABELA VIII - ALGUNS SISTEMAS DE ENDURECIMENTO POR
PRECIPITAÇÃO⁽⁵³⁾

Metal-base	Liga	Seqüência de precipitados	Precipitado de equilíbrio
Al	Al-Ag	Zonas (esferas) → γ' (placas)	→ $\gamma(\text{Ag}_2\text{Al})$
	Al-Cu	Zonas (discos) → θ'' (discos) → θ'	→ $\theta(\text{CuAl}_2)$
	Al-Zn-Mg	Zonas (esferas) → M' (placas)	→ (MgZn_2)
	Al-Mg-Si	Zonas (barras) → β'	→ (Mg_2Si)
	Al-Mg-Cu	Zonas (barras ou esferas) → s'	→ $s(\text{Al}_2\text{CuMg})$
Cu	Cu-Be	Zonas (discos) → γ' →	→ $\gamma(\text{CuBe})$
	Cu-Co	Zonas (esferas)	→ β
Fe	Fe-C	ϵ - carboneto (discos)	→ Fe_3C ("ripas")
	Fe-N	α'' (discos)	→ Fe_4N
Ni	Ni-Cr-Ti-Al	γ' (cubos)	→ $\gamma(\text{Ni}_3\text{Ti, Al})$

2.4.6 - IDENTIFICAÇÃO DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

A condição de tratamento térmico das peças é indicado pela letra 'T', colocada logo após o número que identifica a liga.

A letra 'T' deverá ser seguida por um ou dois algarismos que vão de 1 a 10. Estes números identificam uma seqüência de procedimentos ou de tratamentos térmicos que a peça irá sofrer.

- Estado T1⁽⁴⁶⁾ - esfriado de uma temperatura elevada após um processo de conformação e envelhecido artificialmente.

- Estado T2⁽⁴⁶⁾ (56) - recozimento aplicado somente a peças fundidas para melhorar a ductilidade.

- Estado T3⁽⁴⁶⁾ (56) - tratado por solubilização para realização

de trabalho a frio.

- Estado T4⁽⁴⁶⁾(56) - tratado por solubilização e inteiramente envelhecido a temperatura ambiente.
- Estado T5⁽⁴⁶⁾(56) - envelhecido artificialmente, após esfriado do estado de fabricação, como fundição ou extrusão.
- Estado T6⁽⁴⁶⁾(56) - tratado por solubilização e envelhecido artificialmente.
- Estado T7⁽⁴⁶⁾(56) - tratado por solubilização e estabilizado e envelhecido artificialmente.
- Estado T8⁽⁴⁶⁾(56) - tratado por solução, trabalho a frio e envelhecido artificialmente.
- Estado T9⁽⁴⁶⁾ - tratado por solução, envelhecido artificialmente e encruado a frio.
- Estado T10⁽⁴⁶⁾ - envelhecido artificialmente sem ser tratado por solução e trabalhado a frio.

3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 - EQUIPAMENTOS USADOS

A - Forno de aquecimento elétrico do tipo poço, com potência nominal, de 3 kw com resistência de 16,13 e corrente de 13.6 A, ligado à rede de 220 V. A resistência é feita com o fio DSD da Kanthal com 1,8 mm de diâmetro. A capacidade de fusão do forno é de 2 kg de alumínio.

O forno é totalmente hermético e a tampa é fixada ao corpo do forno por quatro parafusos M12 e a vedação é feita por meio de dois anéis de borracha.

B - Quadro de controle usado para manter um controle rigoroso da qualidade do ar usado. O quadro é equipado com um filtro de ar, um regulador de pressão para a faixa de 0 a 4 kgf/cm², um manômetro para esta mesma faixa de pressão, uma válvula reguladora de vazão e duas válvulas de controle direcional fechadas, como mostra a figura 19.

C - Forno de aquecimento elétrico usado para desceragem e sinterização dos moldes cerâmicos ligados à rede 220V com capacidade de aquecer 10 moldes ao mesmo tempo, até uma temperatura de 1000^oC. A resistência é feita com fio DSD da Kanthal com diâmetro de 3,00 mm. O forno contém ainda dois orifícios na parte inferior para o escoamento da cera, quando da desceragem.

D - Misturadores de lama, possuem tanques com capacidade

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

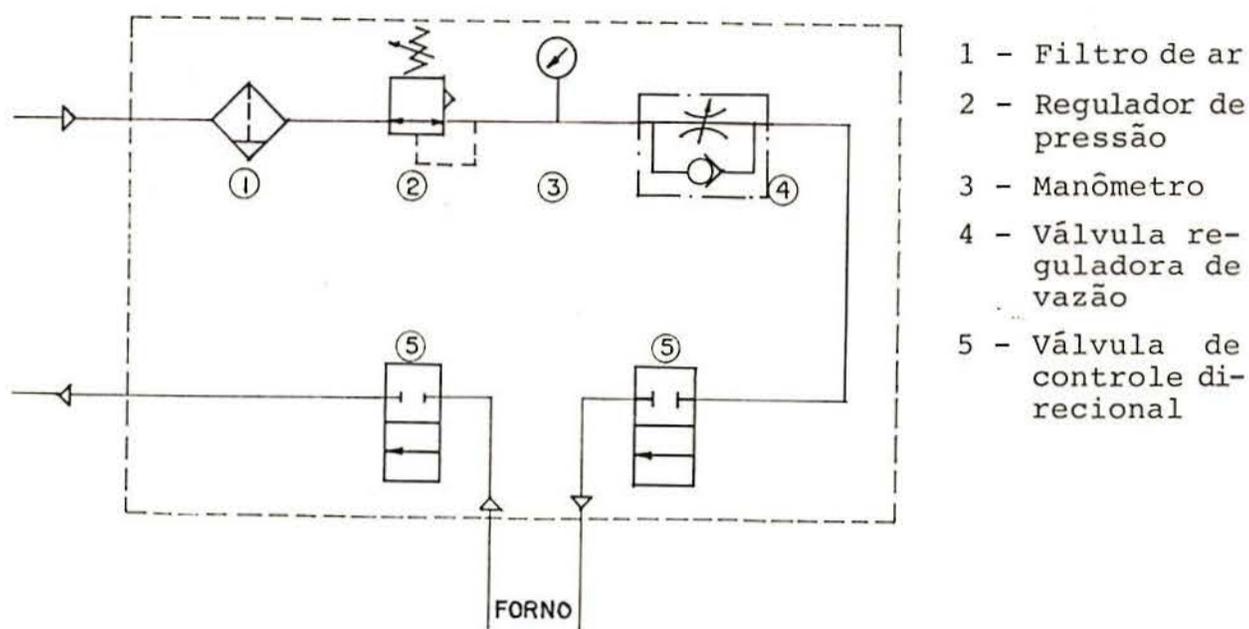


Fig. 19 - Esquema gráfico do funcionamento do quadro de controle usado para o ar comprimido

para aproximadamente 90kg de lama com diâmetro de 300 mm e altura de 430 mm. O redutor de velocidade do mesmo possui capacidade de reduzir a rotação do motor de 1140 rtm pa 38 rtm, permitindo uma boa homogeneização da lama.

Foram usados, ainda, um forno poço para confecção de cera, com capacidade de 8 kg, um equipamento de banho-maria para derreter a cera e vaziar nos moldes de PVC, uma balança digital com precisão de centésimos de grama, uma politriz com capacidade de polir quatorze corpos de prova simultaneamente, uma lupa para análise da porosidade, um microscópio óptico para análise da microestrutura, uma máquina de ensaio a tração e um durômetro.

3.2 - REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Definiu-se que os experimentos seriam feitos utilizando-

se o método convencional de fundição de precisão ao ar e sob a ação da força da gravidade e o processo de fundição de precisão contra gravidade, utilizando baixa pressão.

No processo de vazamento a baixa pressão, definiu-se que o elemento pressurizador seria ar comprimido e seriam feitos experimentos com pressões de 1 kgf/cm² e 2 kgf/cm².

Para a melhor caracterização dos efeitos de melhoria ou não das propriedades mecânicas, no uso de um ou outro processo de vazamento, optou-se pela variação da temperatura do banho, na hora do vazamento. As temperaturas de vazamento escolhidas foram 650, 700, 750 e 800°C.

Baseando-se em literaturas, ⁽¹⁶⁾ ⁽¹⁷⁾ achou-se necessária a utilização de pelo menos duas temperaturas para os moldes cerâmicos e optou-se por usar 200°C e 300°C.

TABELA IX - MOSTRA OS VALORES DAS TEMPERATURAS USADOS NOS EXPERIMENTOS PARA OS MOLDES CERÂMICOS E PARA O METAL, REFERENTE AOS TRÊS PROCESSOS DE VAZAMENTO

Processo vazamento	Temperatura molde °C	Temperatura vazamento °C			
		650°C	700°C	750°C	800°C
Gravidade	200	X	X	X	X
Baixa pressão 1 bar	200	X	X	X	X
Baixa pressão 2 bar	200	X	X	X	X
Gravidade	300	X	X	X	X
Baixa pressão 1 bar	300	X	X	X	X
Baixa pressão 2 bar	300	X	X	X	X

1 bar = 1kgf/cm²

A velocidade de enchimento dos cachos vazados contra

gravidade a baixa pressão foi definida como constante, sendo mantida em $0,6\text{m}^3/\text{min}$ pra todos os experimentos.

Considerando que a liga 356 permite a execução de tratamento térmico e que este consta das exigências da EMBRAER, achou-se por bem executar o tratamento térmico T6 nos corpos de prova, conforme as normas AMS 4260C, recomendadas pela própria EMBRAER.

Para a confecção dos moldes cerâmicos, adotou-se para a lama primária uma densidade de $2,84\text{g}/\text{cm}^3$ e $2,70\text{g}/\text{cm}^3$ para a lama secundária. Estes valores deveriam ser mantidos pois a densidade influencia nos valores da permeabilidade e esta pode provocar uma variação na velocidade de enchimento dos moldes cerâmicos.

Para não provocar grandes diferenças de permeabilidade e na resistência dos moldes, foi tomada como norma o uso de zircônia de fundição, 80 MESH, para estucar as duas primeiras camadas de lama primária e o uso de chamote tipo 10/35, lavado, para as outras quatro camadas de lama secundária.

Para a realização dos experimentos pelo método contra gravidade foi preciso criar um cacho especial sem bacia de vazamento e com o canal principal mais longo.

No prolongamento do canal principal foi feito ainda um cone com lama primária, na parte externa de maneira que este encaixasse no furo cônico, no centro da tampa do forno. permitindo, assim o posicionamento correto do mesmo, evitando ao máximo o vazamento de ar neste local

Estipulou-se, por medida de economia de material e para facilitar a obtenção dos corpos de prova, que a pressão de ar só seria aliviada após o tempo de 60 segundos da sua aplicação, permitindo, assim, a solidificação do canal principal, propiciando a

obtenção de três corpos de prova.

A utilização do canal principal para obter corpos de prova baseou-se na norma AMS 4260C, que indica o uso destes, quando as peças são pequenas e não é possível obter corpos de prova a partir das mesmas.

Definiu-se, ainda, que além dos testes de resistência à tração, seriam feitas análises com respeito à dureza Brinell, densidade, avaliação de micro-rechupes e análise da microestrutura.

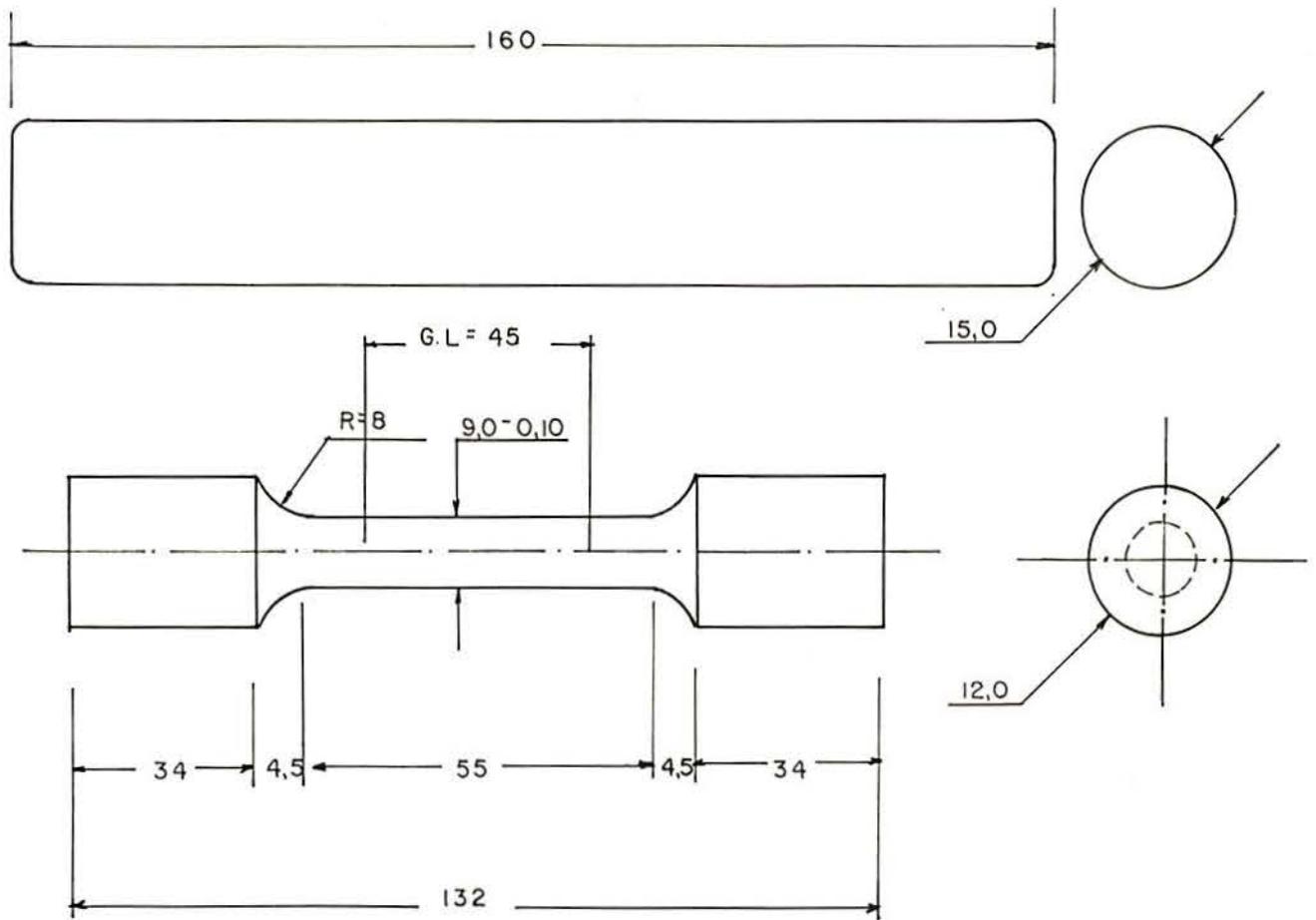


Fig. 20 - Desenho do tarugo fundido para a obtenção dos corpos de prova e o desenho da usinagem dos mesmos

3.2.1 - PREPARAÇÃO DOS MODELOS DE CERA

O primeiro passo desta etapa foi definir qual das composições de cera, usadas no laboratório, seria adotada. A escolha recaiu sobre a cera denominada MI, que, até este momento, era a cera com melhores características para uso em fundição de precisão.

A cera MI é obtida a partir da mistura de elementos como breu, parafina, cera microcristalina, cera de carnaúba e etil acetato de vinila (EVA).

A etapa seguinte constou da preparação da cera. Os elementos constituintes desta são pesados de acordo com a composição e a quantidade de cera que se deseja produzir.

A mistura é preparada em um forno de uso exclusivo para o preparo de ceras e os componentes devem ser colocados no seu interior, em camadas, de acordo com o ponto de fusão. O componente com ponto de fusão mais elevado é colocado no fundo do forno e assim sucessivamente, até que na última camada é colocado o componente com menor ponto de fusão.

À medida que os componentes vão fundindo, começa-se a mexer a mistura, com uma pá de madeira, para facilitar a homogeneização do banho. A agitação do banho deve ser mantida até que a última partícula sólida se funda.

Estando a cera líquida, cessa-se a agitação e deixa-se o banho acalmar por alguns minutos e então efetiva-se o vazamento, em formas metálicas, para que se obtenha tabletes de cera.

Para a produção dos modelos de cera, alguns dos tabletes foram quebrados em pequenos pedaços e colocados dentro de canecos de alumínio e esses levados a um aquecedor, em banho-maria, para

efetuar a fusão da cera.

Durante o tempo de espera para a cera fundir, os tubos matrizes eram preparados, fazendo-se a limpeza dos mesmos e depois aplicando-se uma fina camada de silicone em spray, no seu interior, para facilitar a desmoldagem

Na preparação do tubo para a obtenção do canal principal, coloca-se uma haste metálica no centro, para servir de reforço, devido ao excessivo comprimento deste em relação ao seu diâmetro. Esta precaução foi tomada para evitar possíveis quebras durante a montagem da árvore de modelos ou durante as operações de banho e drenagem para a formação do molde cerâmico.

Estando os moldes preparados e a cera fundida, efetua-se o vazamento desta, no interior do molde e espera-se que solidifique totalmente. Faz-se então a desmoldagem e obtém-se o modelo do canal principal.

De posse dos modelos, parte-se para a montagem das árvores de modelos ou cachos em cera.

O modelo do canal principal é fixado ao dispositivo de montagem, criado especialmente para esta operação, e os bastões de cera são fixados a este por meio de canais de ataque. Os canais de ataque são obtidos através de uma pequena matriz bipartida, feita com durepoxi.

A união dos canais e do canal de ataque ao bastão de cera foi feita mediante o aquecimento de uma ferramenta apropriada, na chama de uma lamparina, e com esta provocando o derretimento das duas superfícies a serem unidas.

Estas ferramentas, além de facilitarem a união das peças,

também servem para dar um melhor acabamento superficial nas regiões das uniões, proporcionado o arredondamento dos cantos ou mesmo alinhando superfícies irregulares, provocadas pelo espalhamento da cera,

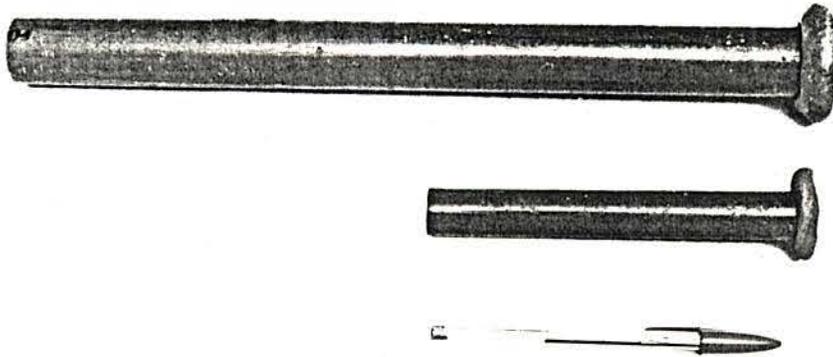


Fig. 21 - Tubos de PVC usados como moldes para obtenção dos modelos em cera dos tarugos dos corpos de prova e do canal principal

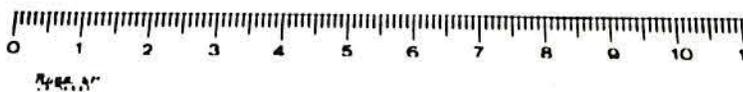
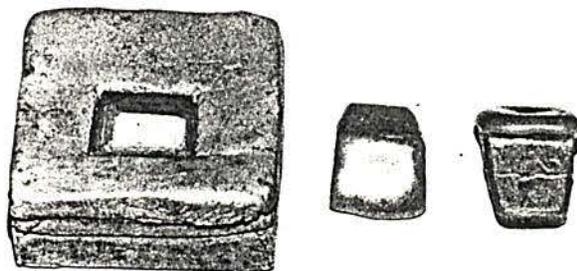


Fig. 22 - Matriz em durepoxi usada para obtenção dos modelos em cera dos canais de ataque

que ocorre quando as duas superfícies a serem coladas são pressionadas uma contra a outra.

Depois de concluída a montagem do cacho, estes são pendurados, por meio de ganchos, em estantes apropriadas e são deixados em uma sala climatizada, com temperatura constante de 23°C , por período de no mínimo 24 horas, para que ocorra a homogeneização da temperatura e então se possa iniciar a formação do molde cerâmico.



Fig. 23 - Ferramentas criadas para facilitar a montagem dos cachos de cera e dar bom acabamento nas uniões

3.2.2 - PREPARAÇÃO DAS LAMAS

Definidas as densidades adequadas para uso nas lamas primária e secundária e do tipo de ligante a ser usado, passou-se à fase de cálculos para a determinação das quantidades de cada componente envolvido na preparação da mistura.

O ligante usado para ambas as lamas foi o Nalco 30, nome comercial dado à sílica coloidal fabricada pela Nalco Produtos

Químicos. O material refratário usado na mistura foi a zirconita, fornecida pela Nuclemon, sendo a zirconita ALW usada para a lama primária e a zirconita A200 usada no preparo da lama secundária.

Para a lama primária adotou-se a densidade de $2,84\text{g/cm}^3$, valor esse acima do valor normalmente usado no laboratório, com o propósito de melhorar o acabamento superficial das peças.

Para a lama secundária foi adotado o valor de $2,70\text{g/cm}^3$, também acima do valor usual, agora com a finalidade de melhorar a aderência do chamote durante a estucagem.

O primeiro passo para a elaboração da lama é calcular o volume de lama que se deseja preparar. A partir das dimensões do tambor e da fórmula do volume de um cilindro, concluiu-se que poderiam ser preparados 28,7 litros de lama.

$$V_t = \frac{\pi \cdot D_t^2}{4} \cdot H_t$$

V_t = volume de lama (l)

H_t = altura da lama no tambor (dm)

D_t = diâmetro do tambor (dm)

$$V_t = \frac{\pi \cdot (2,95)^2}{4} \cdot 4,2$$

$V_t = 28,7$ litros

Estes 28,7 litros de lama têm uma massa de 81,5KG, valor esse que é obtido com a fórmula:

$$m_l = \rho_l \cdot V_t \quad \rho_l = \text{densidade desejada para a lama (kg/dm}^3\text{)}$$

V_t = volume de lama (l)

$$m_l = 2,84 \cdot 28,7$$

$$m_l = 81,5 \text{ kg}$$

Usando um gráfico fornecido pelo fabricante da sílica coloidal, obtém-se a relação da quantidade do ligante e de pó re-

fratário necessários para a obtenção da lama com determinada densidade.

Assim sendo, para a lama de densidade $2,84\text{g/cm}^3$ é necessário 78% de zirconita e 22% de nalco, percentagem esta em peso ou ainda 4,3kg de zirconita para cada litro de nalco.

A partir desta relação, pode-se calcular a massa de lama que existe neste mistura padrão.

$$mm_{\text{mistura}} = \rho_n \cdot V_n + m_z \quad \begin{array}{l} \rho_n = \text{densidade nalco } 30 \text{ (kg/l)} \\ V_n = \text{volume nalco} \\ m_z = \text{massa zirconita} \end{array}$$

$$mm_{\text{mistura}} = 1,2 + 4,3$$

$$mm_{\text{mistura}} = 5,5\text{kg}$$

Ou seja, misturando-se 1 litro de nalco com 4,3kg de zirconita, obtém-se uma lama com densidade de $2,84\text{g/cm}^3$ e possui massa de 5,5kg.

Sabendo-se o valor da massa da mistura padrão, pode-se calcular quantas vezes esta se repete nos 81,5kg de lama a serem preparados.

$$\frac{ml}{mm} = N_{\text{mistura}}$$

ml = massa de lama

mm = massa mistura

N_{mistura} = número de vezes que a mistura se repete

(1 de nalco)

$$N_{\text{mistura}} = 4,3 = M_{tz}$$

M_{tz} = massa total de zirconita

$$\frac{81,5}{5,5} = 14,8 \text{ litros de nalco}$$

$$14,8 \cdot 4,3 = 63,6 \text{ kg de zirconita}$$

Então, para efetuar a preparação da lama primária, foi preciso 14,8 litros de nalco e 63,6kg de zirconita.

Para a preparação da lama secundária, os procedimentos de cálculo são os mesmos, mudando apenas a densidade desejada.

No caso da lama secundária, a densidade desejada é ... $2,70\text{g/cm}^3$, o que proporciona uma massa de 80,2kg de lama resultante da mistura de 16,7 litros de nalco e 60,1kg de zirconita.

Para se obter a lama coloca-se primeiramente a parte líquida, que é o ligante, dentro do tambor do misturador e aciona-se a chave para iniciar a agitação. Passa-se então a adicionar a parte sólida, que é a zirconita, de forma lenta e gradual, para evitar a formação de pelotas de pó no líquido.

O aparecimento das pelotas é diminuído, fazendo com que a zirconita seja espalhada sobre a superfície do líquido com o auxílio de uma peneira com malha de 0,75mm, facilitando a absorção do pó pelo ligante.

Terminada a adição do pó refratário, a lama fica por 24 horas sem uso para que a homogeneização da mistura se complete e ocorra a expulsão de eventuais bolhas de ar que venham a ficar retidas na lama durante o preparo.

Decorridas as 24 horas, adiciona-se um agente de molhamento à lama, na proporção de 0,03% do peso, para melhorar as características umectantes da mesma. Após algumas horas, adiciona-se um agente anti-espumante, na proporção de 0,015% do peso, para facilitar a expulsão das bolhas de ar oriundas do processo de mergulhamento dos cachos para a formação da casca cerâmica.

Efetuada a adição do agente anti-espumante, deixa-se a lama por mais 24 horas sem uso, para promover a total homogeneização da mistura.

Após este intervalo de tempo, a lama está pronta e liberada para o uso.

Com o uso da lama, o nível no tanque vai baixando e chega em certo ponto que não é mais possível banhar os cachos, então, é preciso completar a quantidade de lama no tanque. Os procedimentos de cálculo são os mesmos usados no preparo inicial da lama e a mistura é feita no próprio tanque, sobre a lama já existente.

3.2.3 - OBTENÇÃO DOS MOLDES CERÂMICOS

O procedimento usado para a obtenção dos moldes cerâmicos foi baseado nos procedimentos normalmente usados pelo laboratório de fundição de precisão da UFRGS.

Este procedimento produz um molde cerâmico com seis camadas refratárias. Este número de camadas propicia uma boa resistência mecânica, suportando bem a desceragem e sendo capaz de resistir aos esforços provocados pelo processo de vazamento contra gravidade.

Para a confecção da primeira camada, não foi necessário nenhum tipo de limpeza ou decapagem da camada superficial da cera para que a lama tivesse uma boa adesão à cera, devido ao uso de agente de molhamento, durante o preparo da lama.

O tempo que o cacho permanece mergulhado na lama é de 60 segundos aproximadamente. Este tempo propicia uma boa aderência da lama à cera na elaboração da primeira camada, e nas demais camadas é suficiente que ocorra uma boa penetração da lama na camada anterior, permitindo maior uniformidade no molde.

Decorridos os 60 segundos, o cacho é retirado da lama e

passa a ser drenado sobre o tambor do misturador. Esta operação visa obter uma camada uniforme de lama sobre o cacho. Com a camada ainda úmida, o cacho é levado a um chuveiro, onde recebe uma camada de estuco, que fica aderida à lama, formando mais uma camada.

Devidamente estucado, é pendurado na estante, onde permanece por um período mínimo de 2 horas. Este tempo é necessário para que a camada seque e possa resistir a um próximo banho de lama sem que ocorra a destruição da anterior.

Durante o período em que as lamas estavam sendo usadas, fez-se o acompanhamento diário da densidade e viscosidade.

A medida da densidade foi feita usando um balão volumétrico de vidro, com graduação de 100ml e uma balança digital com precisão de centésimos de grama.

Para se obter a densidade, faz-se o seguinte cálculo:

$$\rho = \frac{Ml}{Vb}$$

Ml = massa de lama contida no balão volumétrico (g)
Vb = volume do balão (cm³)

A variação da densidade das lamas ocorre principalmente pela evaporação da água que constitui o ligante.

Para que a lama volte a apresentar a densidade ideal, pode-se repor esta água, efetuando o seguinte cálculo:

$$x = \frac{Vl (\rho_m - \rho_d)}{(\rho_d - 1,0)}$$

x = quantidade de água destilada a ser adicionada (l)
 ρ_m = densidade atual medida (g/cm³)
 ρ_d = densidade desejada (g/cm³)
Vl = volume atual de lama (l)

A água a ser adicionada deve ser destilada e a lama só pode ser usada novamente decorridas 24 horas após a adição. Este período é necessário para que ocorra homogeneização total da mistura.

A correção da lama visa manter a densidade sempre dentro do valor estipulado para evitar com isso a variação das características mecânicas e a permeabilidade do molde.

A viscosidade foi avaliada usando-se o método do copo Zahn. Para isto foi usado o copo de número 5, para ambas as lamas, e um cronômetro digital.

Completas as seis camadas necessárias para o molde, deixam-se os cachos pendurados, por 24 horas, na sala climatizada, para que toda a umidade seja eliminada e os mesmos possam ser descerados.

A desceragem é feita em um forno elétrico, aquecido previamente à temperatura de 900°C , onde são colocados dois cachos de cada vez. O forno a 900°C provoca um choque térmico, ocasionando um rápido derretimento e saída da cera. Os cachos permanecem no forno por 20 minutos, sendo após retirados e enrolados em manta isolante para que resfriem lentamente.

Quando os moldes atingem novamente a temperatura ambiente, são submetidos a uma inspeção visual para detectar fissuras ocasionadas pela expansão da cera durante o processo de desceragem.

Caso ocorram fissuras, estas são consertadas passando uma camada de lama primária com o auxílio de um pincel.

Nos moldes usados para o processo normal de vazamento de metal, esta operação de conserto é a última etapa antes da sinte-

rização. Para os moldes usados no processo de vazamento contra gravidade usando baixa pressão, é necessário fazer ainda um cone cerâmico, externamente ao molde, e fazer a selagem da parte do canal principal que ficará mergulhada no metal líquido.

O cone cerâmico é feito usando-se uma matriz metálica, que é posicionada na região correta e preenchida com lama primária. Após a secagem da lama, a matriz é retirada, obtendo-se o molde cerâmico com o cone para a fixação do mesmo à tampa do forno.

Com a finalidade de diminuir a permeabilidade na região do molde que fica dentro do forno, foi feita, neste pedaço de molde, uma selagem com lama primária. A selagem é feita mergulhando o molde na lama por aproximadamente 10 segundos e retirada para que o excesso de lama escorra. O cacho pronto pode ser visto na figura 24.

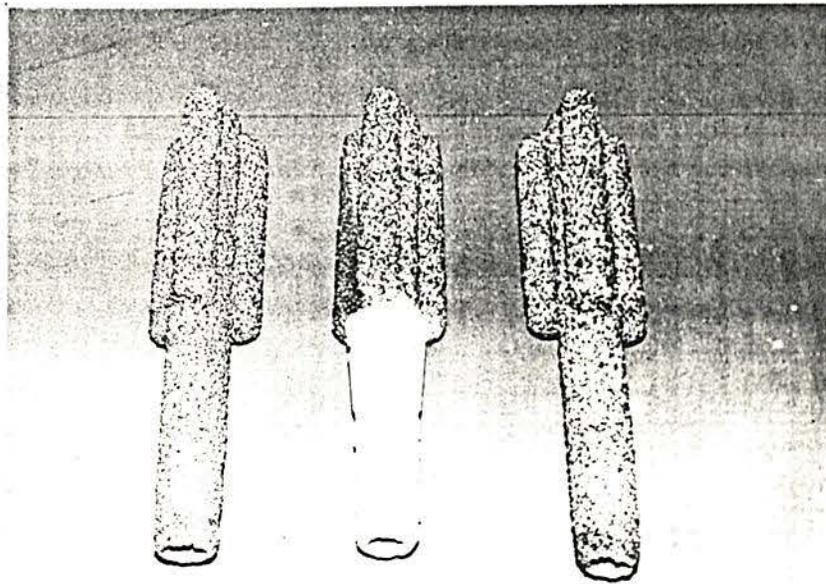


Fig. 24 - Moldes cerâmicos usados no método de vazamento contra gravidade, sendo que o do centro já está pronto, com o cone cerâmico e o canal principal selado

3.2.4 - PROCESSOS DE VAZAMENTO

Na realização dos experimentos, utilizaram-se dois processos distintos de vazamento e para isso foi necessário utilizarem-se duas metodologias. Mesmo sendo diferentes, alguns procedimentos são iguais para que seja possível a comparação entre os métodos.

3.2.4.1 - PROCESSO DE VAZAMENTO CONVENCIONAL

No processo de vazamento convencional, os procedimentos adotados foram os mais comuns possíveis, porém com o cuidado para que todos os passos seguissem um roteiro e possibilitasse uma boa repetitibilidade e confiabilidade dos experimentos.

Este processo de vazamento foi usado para a realização dos experimentos em dois lotes de moldes, sendo que cada lote continha quatro moldes. Para o primeiro lote, os moldes foram aquecidos à temperatura de 200°C e os vazamentos do metal foram feitos à temperatura de 650°C, 700°C, 750°C e 800°C. Para a realização do segundo lote, as temperaturas de vazamento foram as mesmas, mudando apenas a temperatura dos moldes, que neste caso, foi de 300°C.

Os procedimentos usados na realização dos experimentos foram basicamente os seguintes:

Os moldes foram colocados dentro do forno elétrico para serem aquecidos à temperatura desejada. Feita esta etapa, passou-se à preparação do forno de fusão.

O forno foi carregado com pedaços de lingote da liga 356, que foram cortados e limpos previamente. A temperatura no forno é controlada por meio de um termopar colocado no cadinho, saindo por um orifício situado na tampa. Quando o banho atinge a temperatura

de vazamento, o forno é desligado, faz-se a desgaseificação usando Degase 190, na proporção de 0,25% do peso. Liga-se novamente o forno, agora sem tampa, e efetua-se o controle da temperatura por meio de um termopar do tipo K e um milivoltímetro digital para se ter maior precisão na medida.

Nesta fase dá-se um sobreaquecimento de 5°C no banho para que seja feita a retirada do cadinho do forno e seja limpa a superfície do banho, com o auxílio de uma escumadeira.

Enquanto estas operações estão sendo feitas com o metal, um molde é retirado do forno de aquecimento e trazido para as proximidades do forno de fusão, onde é posicionado sobre um colchão de areia.

O metal é vazado quando atinge a temperatura estipulada. O vazamento é feito de forma contínua e num tempo em torno de 5 a 10 segundos.

As ferramentas usadas no trato do banho foram previamente limpas e pintadas com tinta refratária para evitar uma possível contaminação deste com o ferro.

Para se ter garantia da temperatura dos moldes, foi feito um controle prévio, retirando-se vários moldes do forno de aquecimento e feito todo o percurso, simulando as operações, até a hora do vazamento. Durante o percurso e espera, foi mantido um termopar no interior do molde, e pode-se constatar que neste intervalo de tempo não ocorria variação sensível na temperatura interna do molde.

Após o vazamento, é feito novo carregamento, seguindo-se o mesmo procedimento. O próximo vazamento foi feito com uma temperatura mais elevada que a anterior, sempre da temperatura mais

baixa para a mais alta, evitando assim que o metal atinja uma temperatura superior à temperatura de vazamento e, com isso, possa influir nos resultados a serem obtidos.

O tempo médio para se efetuar o primeiro vazamento de uma série demorou aproximadamente 2 horas; os vazamentos seguintes ocorreram com intervalo de mais ou menos 45 minutos entre um e outro.

Os cachos, após o vazamento, foram deixados resfriar ao ar até atingirem a temperatura ambiente e depois desmoldados. Posteriormente, as peças que serviriam para a confecção dos corpos de prova, foram separadas dos canais de ataque e devidamente identificados.

3.2.4.2 - PROCESSO DE VAZAMENTO CONTRA GRAVIDADE A BAIXA

PRESSÃO

Para a realização deste processo de vazamento, teve-se o cuidado em repetir todas as operações do processo convencional que foram possíveis e com isso manter uma uniformização da maioria das operações, tornando a comparação dos processos mais coerente.

No processo contra gravidade foram realizados experimentos com quatro lotes, sendo que cada um com quatro moldes. Foram adotadas para os moldes as temperaturas de 200°C e 300°C e os vazamentos foram feitos a 650°C, 700°C, 750°C e 800°C, ou seja, os mesmos parâmetros usados no processo convencional.

A maior modificação ocorreu na pressão de vazamento. No processo de vazamento convencional, estes foram feitos a pressão atmosférica e no processo contra gravidade foram usadas pressões da ordem de 1kgf/cm² e 2kgf/cm³ acima da pressão atmosférica.

Os preparativos para a realização dos experimentos come-

çaram com o carregamento do forno de aquecimentos dos moldes cerâmicos, passando-se em seguida para o forno de fusão.

Colocou-se, no interior do poço do forno, um calço cerâmico para promover a elevação do cadinho de grafite e ajustar a altura do fundo do mesmo com a boca do molde cerâmico. Efetua-se o carregamento do mesmo com pedaços de lingote da liga 356, que foram previamente cortados e limpos.

O tempo até a primeira fusão foi de aproximadamente duas horas, tempo este suficiente para que ocorresse o aquecimento e a homogeneização da temperatura dos moldes.

Durante este período, fizeram-se outros preparativos para deixar o equipamento em condições de efetuar o vazamento. Instalou-se o quadro de controle ao equipamento, regulou-se a pressão e a vazão a ser usada.

Quando a temperatura do metal atingiu a temperatura desejada, desligou-se o forno e realizou-se a degazeificação e a limpeza do banho tal qual foi feita no processo convencional.

Ligou-se novamente o forno para reaquecer o metal e dar um sobreaquecimento de 5°C , necessário para que fosse possível a colocação do molde no equipamento, e deste no forno, e após estas operações o metal estivesse na temperatura de vazamento.

Nesta etapa, o controle da temperatura foi feito com um termopar do tipo K e um milivoltímetro digital.

Quando o metal atingiu a temperatura estipulada, desligou-se o forno e posicionaram-se os anéis de borracha sobre o assento metálico do forno, onde o equipamento seria posicionado.

Simultaneamente a essa operação, retirou-se um molde do

forno de aquecimento, colocou-se um pedaço de manta refratária no local onde a mola de fixação ficou apoiada. Posicionou-se a travessa com a mola no local e efetuou-se o rosquamento das borboletas que a fixam ao equipamento.

Pegou-se o equipamento pelas alças e colocou-se o mesmo sobre o forno, de maneira que a sua furação coincidisse com a furação rosqueada do forno e fez-se o aparafusamento, garantindo assim a vedação do sistema, como pode ser visto na figura 25.

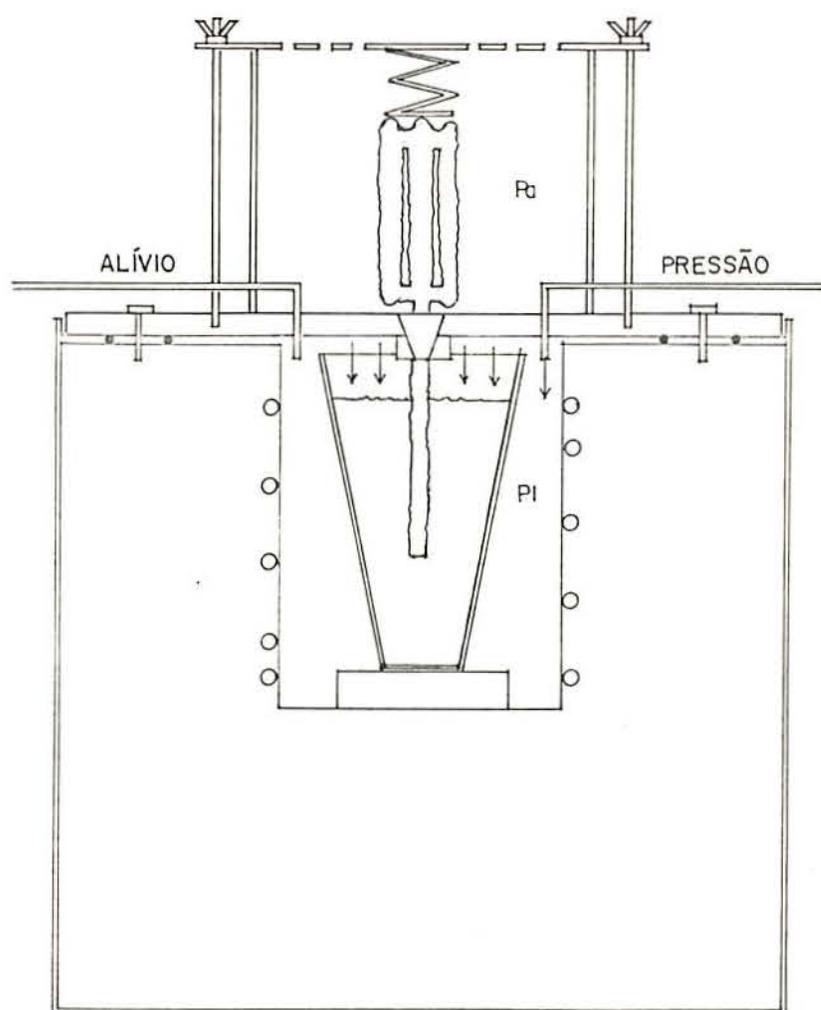


Fig. 25 - Desenho esquemático do equipamento usado para a realização do vazamento contra gravidade usando baixa pressão

O conjunto de operações que vão do desligamento do forno até o aparafusamento do equipamento ao forno duraram de 30 a 45 segundos aproximadamente.

Após o aparafusamento ser completado, abriu-se a válvula de alimentação, no quadro de controle, e ocorreu a pressurização do forno. Manteve-se a pressão por 60 segundos, fechou-se a válvula de alimentação e abriu-se a válvula de descarga, fazendo com que o metal não solidificado voltasse para o cadinho.

Aliviada a pressão, retiraram-se os parafusos, tirou-se o equipamento do forno, soltou-se a travessa de fixação e retirou-se o molde.

Os moldes resfriaram ao ar até atingirem a temperatura ambiente, quando foram desmoldados e realizados os cortes para separar as peças dos canais de ataque e foi feita a identificação dos mesmos. Procedeu-se a recarga do cadinho e foram começados os preparativos para um novo vazamento.

3.2.5 - TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico para a liga 356 caracteriza-se pelo longo tempo de duração e pela estrita faixa de mais ou menos 5°C de operação, limitando os equipamentos a serem usados.

Para este tratamento térmico, utilizou-se um forno elétrico com banho de sal, onde a temperatura é controlada com o auxílio de computador e é possível manter a variação da temperatura dentro da faixa estipulada. Pode-se, também, acompanhar a oscilação na temperatura do banho por meio de um registrador gráfico junto ao sistema de controle do forno.

O sal usado no aquecimento dos corpos de prova é específico

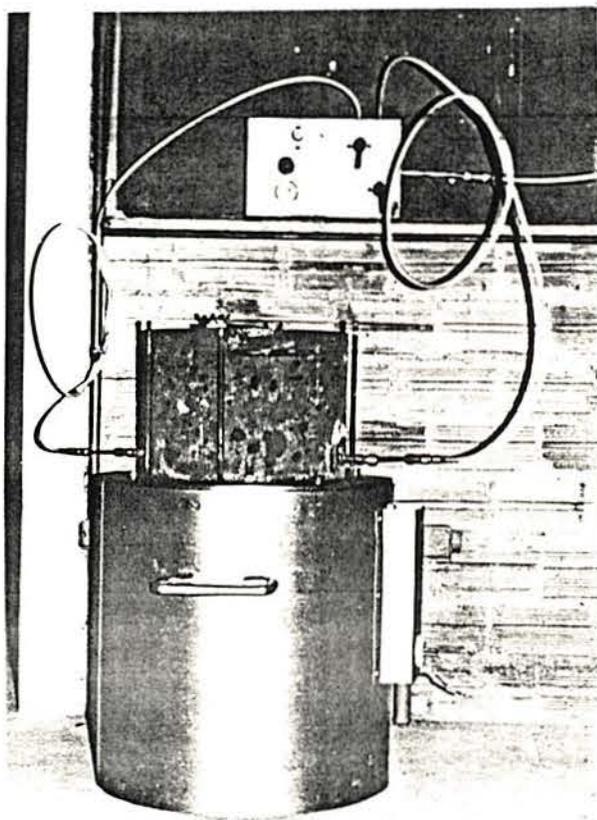


Fig. 26 - Equipamento usado para o vazamento contra gravidade, composto de quadro de controle para o ar comprimido, forno para fusão, tampa de vedação e câmara de proteção

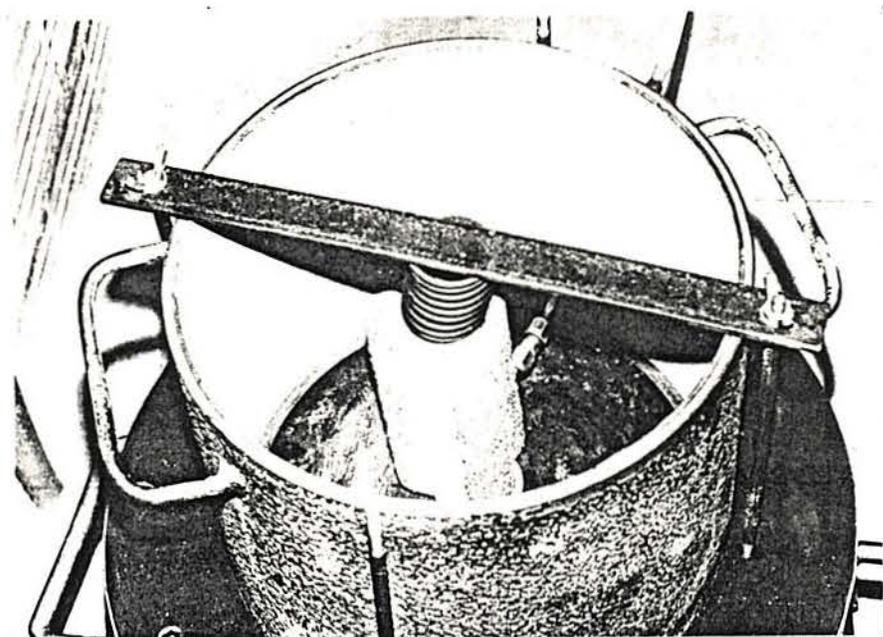


Fig. 27 - Câmara de proteção, mostrando a posição do cacho e a mola de sujeição do mesmo

para uso em ligas de alumínio, não causando problemas de corrosão na superfície e nem provocando a contaminação da liga pela difusão.

Para facilitar e agilizar o manuseio dos 63 corpos de prova, estes foram divididos em 3 lotes. Para se fazer a amarração dos corpos de prova em lotes, foi preciso fazer um furo passante de 1mm de diâmetro em uma das extremidades; por esse furo passou-se um fio de aço inox e foi montado assim uma espécie de colar com os corpos de prova, que facilitou o manuseio.

Os colares foram introduzidos no banho de sal, que estava a 540°C e ali permanecendo por um período de 12 horas, para que ocorresse a solubilização dos componentes da liga.

Retiraram-se os corpos de prova do forno e colocaram-se rapidamente em um recipiente com água aquecida a 65°C para que ocorresse um choque térmico e fosse possível obter a estrutura desejada nos corpos de prova.

Os corpos de prova permaneceram por 60 segundos mergulhados na água e depois deixados ao ar para atingirem a temperatura ambiente.

A segunda parte do tratamento térmico T6 foi a precipitação. Esta foi feita em um forno elétrico aquecido à temperatura de 155°C. Os corpos de prova foram mantidos por 4 horas no interior do forno, depois retirados e deixados resfriar ao ar.

Os corpos de prova foram colocados no forno ainda amarrados com arame, pois assim podiam ser posicionados em pé, formando um tronco de cone, diminuindo o contato com a soleira do forno e melhorando as condições para o tratamento térmico.

Após o resfriamento, os corpos de prova estavam prontos

para serem usinados.

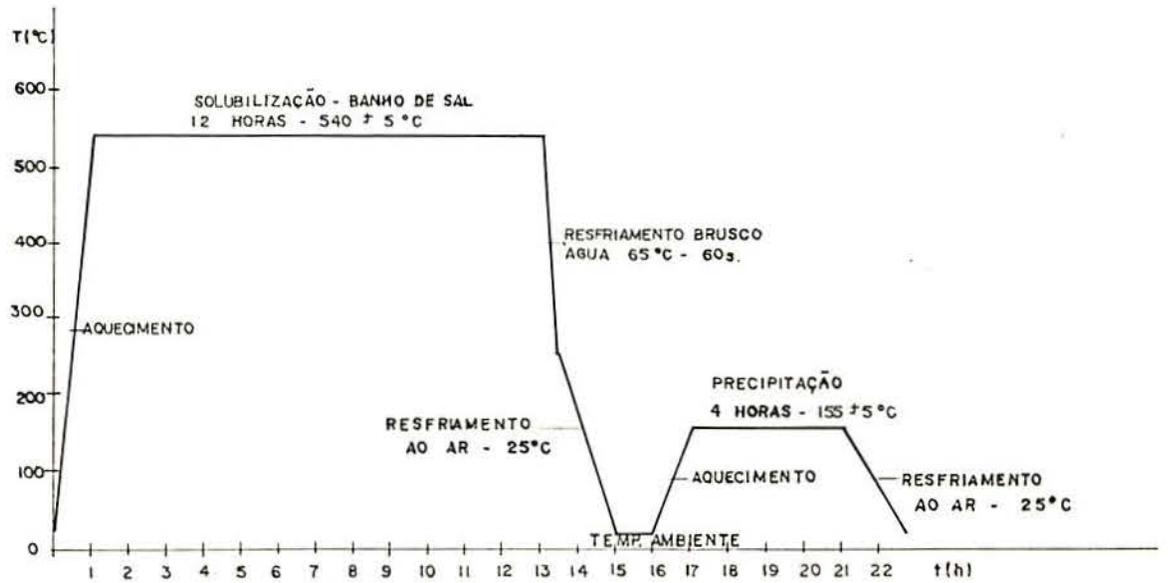


Fig. 28 - Esquema gráfico do ciclo de tratamento térmico T6 usado nos experimentos

3.2.6 - USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A etapa seguinte ao tratamento térmico foi a usinagem dos corpos de prova. Até esta fase, os corpos de prova possuíam a forma de uma barra cilíndrica com 15mm de diâmetro e 160mm de comprimento.

De acordo com a norma escolhida, as tolerâncias dimensionadas são bastantes rígidas e, em virtude disso e do reduzido número de corpos de prova para cada experimento, optou-se por fazer a usinagem dos mesmos em um equipamento que garantisse uma boa eficiência e qualidade no processo.

A usinagem foi feita em um torno copiador, eliminando os possíveis erros de operação cometidos pelo operador mantendo as variáveis de usinagem padrão, garantindo-se assim um elevado grau de repetibilidade nas operações, um ótimo acabamento super-

ficial e uma boa precisão dimensional.

A primeira etapa de preparação dos corpos de prova foi o faceamento das duas extremidades com o intuito de se ter duas superfícies paralelas e que fosse também possível fazer um furo de centro em uma delas de forma a facilitar a centralização do corpo de prova no torno copiador.

Providenciou-se a usinagem de um corpo de prova padrão para ser apalpado através de um sistema hidráulico, e transferir os movimentos para a ferramenta de corte, possibilitando a reprodução da forma desejada.

Fez-se a regulagem da ferramenta de corte, bem como da velocidade do corte, da velocidade de avanço e da profundidade do corte para cada passo a ser dado. Foram necessários três passes de torno para se obter os corpos de prova dentro das especificações exigidas. Dois passes foram de desbaste e um último de acabamento onde foram usadas velocidade de corte elevada, velocidade de avanço baixa e uma profundidade de corte bem pequena.

Durante o processo de usinagem não houve nenhum refugo nos corpos de prova. À medida que os corpos de prova eram retirados do torno, fazia-se uma nova identificação e efetuava-se o controle dimensional com o auxílio de um micrômetro.

Devido ao tipo de fixação usado no torno copiador, uma das extremidades do corpo de prova ficou um pouco maior que a outra. Para tornar o corpo de prova simétrico, efetuou-se um corte na extremidade maior e o pedaço restante foi então usado como corpo de prova para análises metalográficas.

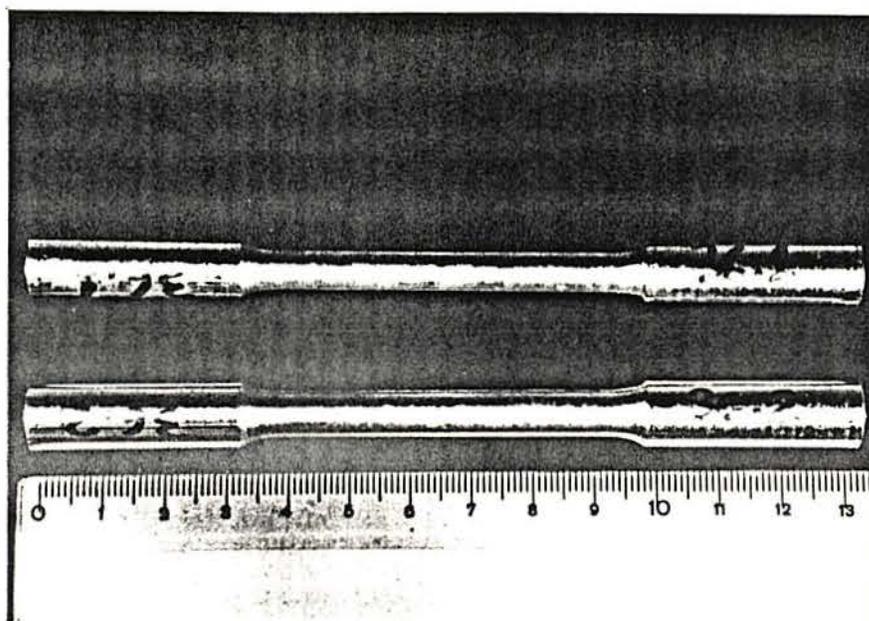


Fig. 29 - Corpos de prova usinados e devidamente identificados

3.2.7 - ENSAIO DE TRAÇÃO

A fase inicial dos preparativos foi destinada à aferição do equipamento, pois este não era usado há alguns meses. Primeiramente fez-se a aferição do sistema, usando para isso um anel dinamométrico de 6MPa. Nesta avaliação constatou-se que o equipamento estava operando dentro da faixa de tolerância permitida e assim apto para ser usado.

Logo em seguida, fez-se a regulagem da velocidade de aplicação de carga, que, para estes experimentos, foi da ordem de 30kgf/s. Escolheu-se ainda uma escala de trabalho que fosse adequada ao tipo de material e às dimensões do corpo de prova.

Foi feita, também, a regulagem do registrador, fazendo com que a pena coincidisse com a origem da escala, no papel graduado e a regulagem do ponteiro do relógio mostrador, no ponto zero da escala.

Completa a etapa de regulamento, passou-se para a reali-

zação dos experimentos propriamente ditos.

Logo após o rompimento de cada corpo de prova, retiravam-se as duas metades da máquina e fazia-se a leitura da carga de ruptura que ficou registrada pelo ponteiro de arraste, no relógio mostrador.

O valor lido era anotado junto à curva feita pelo registrador e fez-se a identificação da mesma para se saber a que corpo de prova pertencia. O valor usado para a confecção dos gráficos foi sempre o valor lido no relógio mostrador, por ser este mais preciso.

Feitas as anotações, pode-se adiantar o papel no graficador e retroceder o ponteiro de arraste, até o ponto de origem, para se iniciar um novo experimento.

3.2.8 - ENSAIO DE DUREZA

Os corpos de prova, para os ensaios de dureza, foram obtidos a partir de uma das metades que resultaram do rompimento dos corpos de prova, visto que estas já possuíam a forma cilíndrica desejada, além de terem uma base bem faceada e perpendicular à face lateral, obtida no processo de usinagem anterior.

Para se obter os corpos de prova, foi necessário fazer uma operação de corte para retirar parte do material excedente e para se obter uma segunda face paralela à face antes mencionada. O corte foi executado em máquina de corte a disco abrasivo e foi necessária a colocação de um gabarito para garantir o paralelismo entre as faces e manter uniforme o comprimento dos cilindros.

Na extremidade resultante do corte foi preciso fazer a

preparação da superfície através do lixamento. Esse lixamento seguiu os mesmos procedimentos usados na preparação de corpos de prova para análises metalográficas. Foram usadas para isso, lixas do número 100 até o número 600, sendo que o lixamento foi feito sobre uma base de vidro e sob água corrente.

Devido ao pequeno diâmetro do corpo de prova, foi escolhida uma esfera de 25mm de diâmetro para colocar na ponta do aplicador da carga, localizada no cabeçote da máquina. Para manter uma relação entre a carga aplicada e o quadrado do diâmetro da esfera: $\frac{Q}{d^2} = 5$, utilizou-se a carga de 31,25kg.

Feito o posicionamento e a regulagem do foco, acionou-se uma alavanca que, através de um dispositivo mecânico e automático, girou o cabeçote, posicionando a ponteira e iniciando a aplicação da carga de forma lenta e gradual.

Cessada a aplicação da carga, manteve-se por mais 15 segundos a pressão sobre a superfície e então promovendo-se a remoção da carga.

É feita a leitura do diâmetro da calota que ficou impressa no corpo de prova. E com este valor, consultou-se uma tabela padrão, própria para carga aplicada e diâmetro da esfera usados, verificando-se o valor da dureza Brinell, referente à impressão.

Fez-se, em média, três testes de dureza para cada corpo de prova e adotou-se como valor para a dureza, a média destas.

3.2.9 - DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

Os testes para avaliar a variação da densidade referente a cada experimento realizado, foram feitos utilizando-se os mesmos

corpos de prova usados nos testes de determinação da dureza. O uso dos mesmos corpos de prova visou facilitar os trabalhos, diminuir custos e reaproveitar um material com boas características de acabamento superficial e dimensional, necessários para a boa realização dos testes.

O método usado para determinação da densidade dos corpos de prova foi de simples execução, mas com bom grau de precisão.

Tendo os corpos de prova a forma cilíndrica e sendo as bases paralelas entre si, usou-se um micrômetro marca Mitutoyo, com precisão de centésimos de milímetro, para fazer o levantamento dimensional. Faz-se, então, a medição do diâmetro e do comprimento do cilindro, tornando possível calcular o volume dos mesmos. Após, fez-se a pesagem dos corpos de prova em uma balança digital com precisão de centésimos de grama.

De posse do valor do volume e do peso de cada corpo de prova, calculou-se, através da fórmula $\rho = \frac{P}{V}$, o valor da densidade.

3.2.10 - PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA AS ANÁLISES METALOGRÁFICAS

Quando da preparação dos corpos de prova para os ensaios de tração, houve uma sobra de material, que foi então guardada para ser usada como corpo de prova para as análises metalográficas.

Devido ao pequeno diâmetro do material, foi preciso fazer o embutimento dos mesmos usando uma resina sintética, com o intuito de aumentar a superfície e com isso diminuir a probabilidade de ocorrer mais de um plano, na superfície, durante o processo de lixamento.

A mistura usada na elaboração da resina para o embutimento foi a seguinte:

- Resina para fibra de vidro 98,08%
- Catalizador 1,57%
- Cobalto 0,35%

A escolha deste tipo de material visou usar um método que não provocasse o aumento da temperatura durante o embutimento e que tivesse baixo custo.

Para o embutimento foi necessário arrumar pequenos aros que foram obtidos cortando um tubo de PVC com 22mm de diametro interno, em pedaços com 18 mm de comprimento.

Para efetuar o embutimento, os 65 aros de PVC foram posicionados sobre uma mesa de fórmica e colocaram-se, no centro dos aros, os corpos de prova, de maneira que a identificação dos mesmos ficasse voltada para cima, e derramou-se a mistura dentro dos aros.

Após 24 horas, os corpos de prova foram retirados da mesa e, devido à forte contração ocorrida na resina, os corpos de prova embutidos se soltaram dos aros de PVC.

Completo o processo de embutimento, passou-se ao processo de lixamento.

Neste processo foram usadas as lixas 100, 240, 320, 400, 500, 600 e 1000, sendo que todos os corpos de prova foram lixados com um tipo de lixa antes de passar para a lixa seguinte. Ao iniciar um novo lixamento, deu-se um giro de 90° no corpo de prova, para que as marcas da lixa ficassem perpendiculares às novas marcas.

Terminado o processo de lixamento, os corpos de prova foram fotografados em uma lupa, com aumento de 4,5 vezes, o qual permitiu a análise do nível de porosidade de cada corpo de prova.

Concluído o trabalho de fotografar, partiu-se para a etapa de polimento dos corpos de prova, para se fazer as análises micrográficas dos mesmos.

O polimento foi feito em uma politriz automática, com capacidade para polir 14 corpos de prova, cada um com diâmetro de 22 mm, ao mesmo tempo. Para isso foi necessário fazer um novo embutimento, pois os corpos soltos terminavam virando devido à combinação de movimentos efetuados pela máquina.

Para acabar com este problema, colocou-se um aro de PVC, onde coubessem os sete corpos de prova e fez-se o novo embutimento, usando cera para modelos, como elemento embutidor.

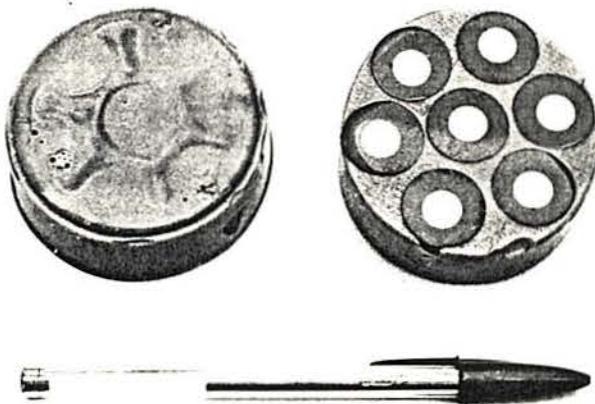


Fig.30 - Embutimento feito com cera para poder polir o maior número de corpos de prova ao mesmo tempo.

No processo de polimento usou-se uma mistura de alumina nº 2 com água destilada e um feltro sintético, do tipo DPNAP. Cada bloco contendo 7 corpos de prova ficou 6 horas em processo de polimento.

Terminada esta fase de polimento, os blocos de cera foram quebrados e cada corpo de prova passou por um novo polimento de acabamento. Para este último polimento foi usada uma mistura de alumina com álcool, que elimina o uso de reativos para a análise micrográfica.

Em seguida, os corpos de prova foram levados a um microscópio para serem observados e fotografados. Para a análise micrográfica, usou-se um aumento de 150 vezes.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCESSOS DE ENCHIMENTO DOS MOLDES

Durante a realização dos experimentos com o processo de vazamento contra gravidade, três moldes cerâmicos tiveram seu enchimento incompleto. Isso veio prejudicar a elaboração de algumas curvas. Mas ajudou na visualização de alguns detalhes que propiciaram o melhor entendimento do mecanismo de enchimento dos moldes e a avaliação da influência que algumas variáveis, tais como: temperatura de vazamento, temperatura do molde, pressão aplicada no forno, permeabilidade do molde e a vazão de ar injetada, possam ter sobre o enchimento.

Na figura 31, podem-se ver dois cachos com enchimento incompleto, onde foram usadas como temperatura de vazamento 650°C e temperatura para o molde, 200°C . O que distingue os dois é o fato de terem sido usadas diferentes pressões, no interior do forno, para que ocorresse o vazamento contra gravidade.

Para a obtenção do cacho da esquerda foi usada uma pressão de 1kgf/cm^2 e para o cacho da direita foi usada uma pressão de 2kgf/cm^2 .

Analisando os cachos, percebe-se facilmente a influência da pressão sobre a capacidade de enchimento dos moldes.

Nota-se, ainda, que no cacho da direita, onde a pressão

foi maior, o canal central é bem maior, comparado com o canal central do cacho da esquerda. Constata-se, também, o enchimento quase que total de um corpo de prova, faltando para isso, apenas o enchimento de uma pequena parte, na ponta superior, e o canal de ataque.

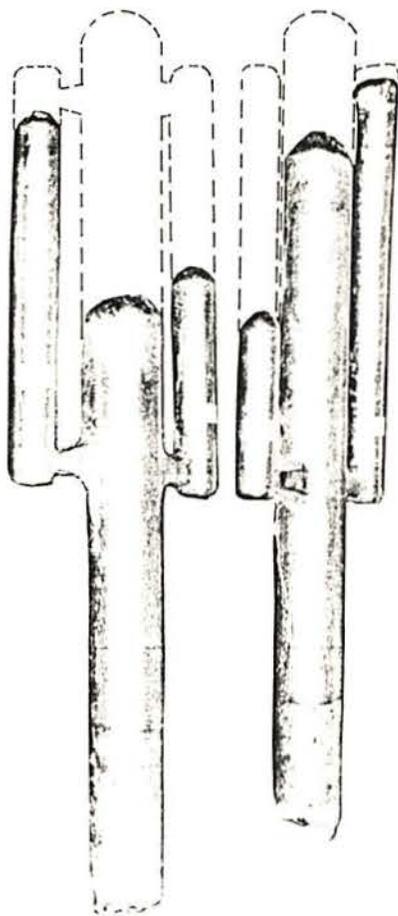


Fig. 31 - Cachinges obtidos pelo método de vazamento contra gravidade usando o metal a 650°C e o molde a 200°C , onde foi usado $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ para o cacho da esquerda e $2\text{kgf}/\text{cm}^2$ para o cacho da direita

A diferença de enchimento nos moldes, neste caso, está ligada diretamente ao uso de uma pressão maior, comprovando assim, a influência desta, no processo de vazamento contra gravidade.

Na figura 32, observa-se também a influência da pressão sobre o enchimento dos moldes cerâmicos.

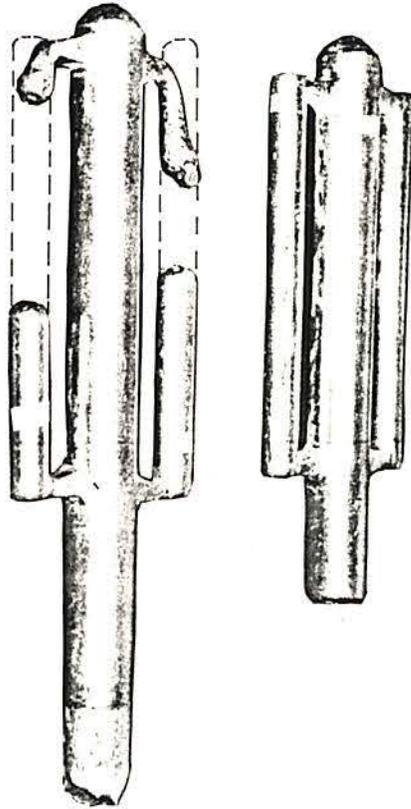


Fig. 32 - Cachos obtidos pelo método de vazamento contra gravidade, usando o metal a 650°C e o molde a 300°C , onde o cacho da direita teve seu enchimento completo usando a pressão de 2kgf/cm^2 e no cacho da esquerda a pressão usada foi de 1kgf/cm^2

Para obter o cacho da esquerda, usou-se o metal à temperatura de 650°C para fazer o vazamento e aqueceu-se o molde a 300°C e utilizou-se uma pressão de 1kgf/cm^2 . Para o cacho da direita, as temperaturas do metal e do molde foram as mesmas, mudando apenas a pressão para 2kgf/cm^2 .

Levando-se em conta que a temperatura do molde e o metal líquido foi a mesma para ambos os experimentos, pode-se dizer que a diferença ocorrida quanto ao enchimento está relacionada com a pressão aplicada, no interior do forno, vindo ao encontro das cons-

tatações feitas, anteriormente, a respeito da figura 31.

Percebe-se, ainda, na figura 32, que no cacho da esquerda os corpos de prova solidificam antes de seu enchimento total, fazendo com que o fluxo de metal continue subindo apenas pelo canal principal até atingir o canal de alimentação superior, onde chegou com baixa fluidez.

O cacho da direita foi o único dos quatro vazados com metal a 650°C , que teve seu enchimento completo, permitindo a obtenção dos corpos de prova para os testes posteriores.

Fazendo-se comparação entre as figuras 31 e 32, percebe-se um maior enchimento nos cachos da figura 32, onde a temperatura do molde usada foi de 300°C . Esta constatação vem confirmar o que a literatura diz a respeito da influência da temperatura do molde, na fluidez do metal, e ratifica os resultados obtidos em experimentos, que avaliam a fluidez do alumínio, realizados no laboratório de fundição da UFRGS.⁽⁵⁸⁾

Comparando-se os corpos de prova localizados à esquerda, nas fotos, constata-se que o acréscimo de 100°C na temperatura do molde, permitiu o maior enchimento do mesmo, mas não foi capaz de proporcionar o seu enchimento completo. Porém, ao analisar os cachos da direita, observa-se que ao usar uma pressão de 2kgf/cm^2 , o aumento de 100°C , na temperatura do molde, é suficiente para obter um cacho totalmente preenchido.

Analisando-se ainda as figuras 31 e 32, percebe-se nos cachos, onde o enchimento não foi total, que as extremidades dos corpos de prova e do canal principal possuem uma superfície convexa.

Esta formação possibilita dizer que a solidificação, nes-

te caso, ocorreu sob ação de uma força que atua no sentido do enchimento, ou seja, de baixo para cima.

Outra constatação que se pode fazer a respeito disto é que a força aplicada, para que o metal preenchesse o molde, atuou durante todo o processo de solidificação do metal, pois, se assim não fosse, ocorreria, nestes locais, o aparecimento de uma superfície côncava, cuja depressão é comumente chamada de rechupe, característica do processo de solidificação.

Também fica evidente, nestas fotos, o bom acabamento superficial obtido, que está diretamente ligado à escolha adequada da densidade da lama primária.

É bom salientar que as fotos dos cachos foram tiradas sem que fosse feito nenhum tipo de limpeza ou preparo, estes foram apenas desmoldados. Mesmo assim é possível notar-se, na figura 32, que, no cacho da esquerda, um dos corpos de prova está espelhado no canal principal, o que vem comprovar a boa qualidade do acabamento superficial.

Baseando-se em dados e informações obtidos, quando da elaboração da revisão bibliográfica^{(38) (36) (34)}, tinha-se a convicção de que o método de vazamento contra gravidade reunia melhores condições para o enchimento dos moldes, comparado com o processo convencional, desde que fossem usados os mesmos valores para a temperatura de vazamento e temperatura do molde. Porém, durante a realização dos experimentos, constatou-se que o preenchimento incompleto do molde, deu-se justamente no processo de vazamento contra gravidade, o que contraria a literatura pesquisada.

Comparando-se as variáveis envolvidas na realização dos experimentos, observa-se que a diferença existente ocorre quando

se confronta as pressões exercidas durante o processo de vazamento. No processo convencional a pressão exercida é a metalostática e que, neste caso, equivale apenas a poucos centímetros de coluna de metal, enquanto que, no processo contra gravidade, a pressão exercida é a pressão fornecida pelo ar comprimido, injetado no interior do forno. Para cada kgf/cm^2 aplicado, no interior do forno, produz-se uma pressão equivalente a aproximadamente 3,7m de coluna de metal.

Se apenas estes dados fossem levado em conta, o processo convencional é que deveria apresentar problemas quanto ao enchimento. Para se ter uma idéia dos motivos que provocaram o não preenchimento dos moldes, no processo contra gravidade, deve-se fazer uma análise mais ampla para detectar as causas.

Levando-se em consideração a geometria interna dos cachos, nota-se, quando do vazamento convencional, que o ar contido dentro do molde pode escoar facilmente, pelo canal de ataque, não trazendo problemas para o enchimento. Entretanto para o vazamento contra gravidade, a geometria interna do cacho não é favorável, pois o ar contido dentro do molde não tem por onde escoar facilmente, provocando, assim, uma contra-pressão que dificulta o enchimento.

Como a geometria dos cachos foi a mesma em ambos os processos, isto veio em prejuízo do processo de vazamento contra gravidade, pois propiciou a formação de uma zona de contra-pressão, diminuindo a ação da pressão de enchimento e assim contribuindo para o não enchimento do molde.

Além de cuidados com a geometria interna dos cachos, foi constatada a grande importância da permeabilidade das cascas cerâmicas para o processo de vazamento contra gravidade. Para este

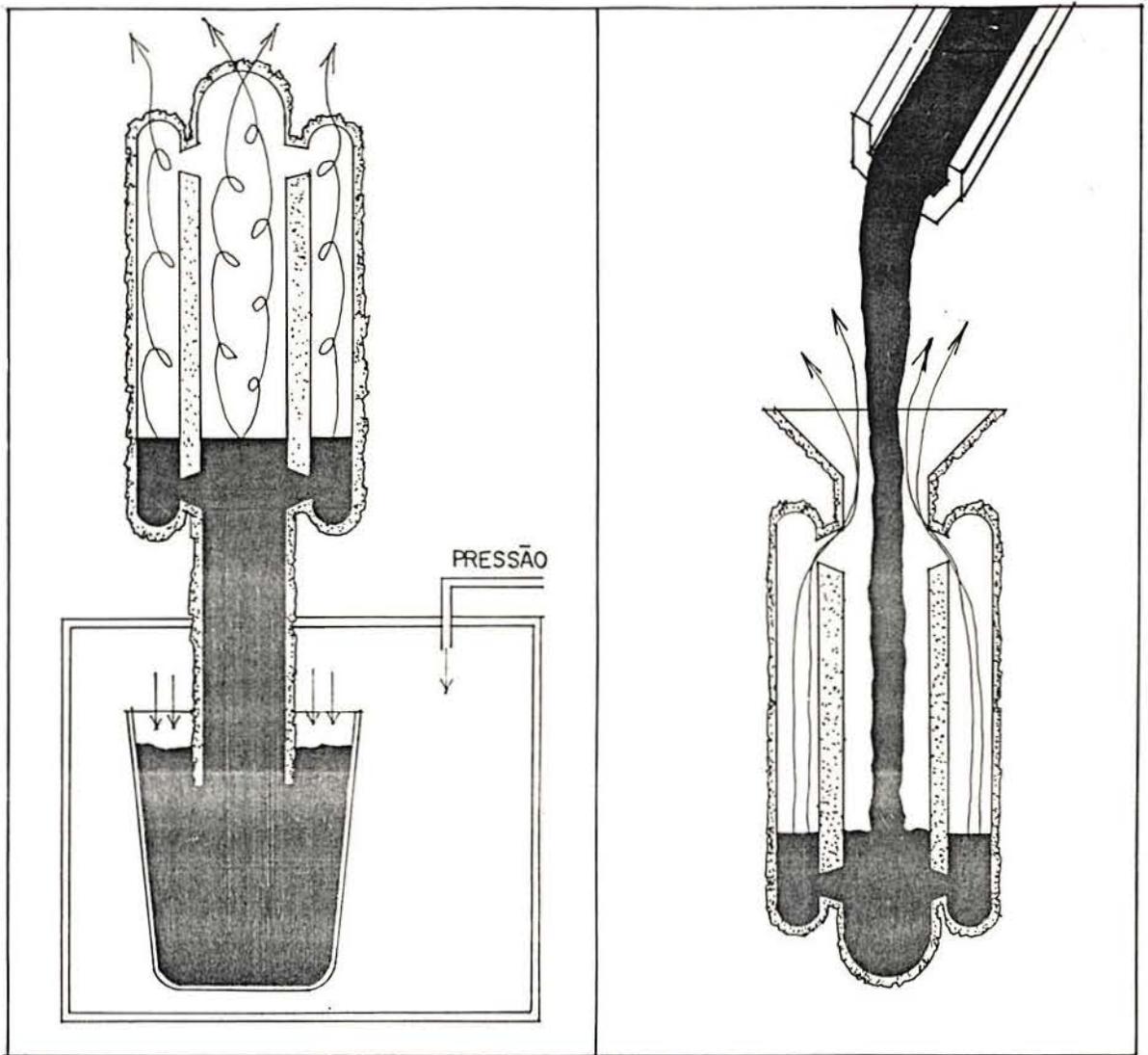


Fig. 33 - Esquema gráfico para demonstrar as formas de expulsão do ar para os dois métodos de vazamentos usados

processo, a permeabilidade da casca deve ser maior, pois esta é a grande responsável pela eliminação do ar contido dentro do molde, e também é importante na determinação da velocidade do enchimento dos moldes e por isso deve ser bem controlada.

Na tabela XIII do Apêndice, estão alguns valores da permeabilidade obtidos a partir de medições feitas em corpos de prova, com as mesmas características dos moldes usados.

A soma destes motivos contribui para o não enchimento dos moldes, no processo contra-gravidade. Isto não vem contradizer a literatura, mas sim reforçar a idéia que neste processo deve-se tomar algumas precauções quanto à geometria, permeabilidade e resistência dos moldes, para que se consiga fazer o enchimento dos moldes com temperaturas mais baixas, tanto para o metal, quanto para o molde pelo processo de vazamento contra gravidade, como ressalta a literatura.

4.2 - ANÁLISES DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Após a realização dos ensaios de tração em todos os corpos de prova, fez-se a compilação dos dados obtidos, para que fosse possível analisar os resultados e evidenciar o comportamento de cada um dos processos de vazamento.

A primeira constatação que se teve foi a respeito do uso de corpos de prova feitos a partir do canal principal. Segundo a norma AMS 4260 C item 3.4.2, é permitido o uso deste canal para a confecção de corpos de prova, quando não são fundidos corpos de prova específicos ou as peças são muito pequenas e não permitem a confecção dos corpos de prova a partir delas.

Nos ensaios realizados, os resultados obtidos com os corpos de prova do canal principal, foram muito baixos comparados com os resultados obtidos para os corpos de prova feitos especificamente para este fim. Estes baixos valores podem estar associados ao maior número de poros existentes nos corpos de prova, pois estes foram retirados da parte do canal principal que tem a função de massalote neste processo, atraindo para si os poros, provocando a menor resistência à tração. A grande diferença, nos resultados, provocou o abaixamento nos valores médios a serem registrados

nos gráficos, e por isso resolveu-se excluir estes resultados dos gráficos representativos para cada processo, fazendo-se uma representação exclusiva para estes valores, de forma a realçar a grande diferença existente entre estes resultados e os resultados dos corpos de prova feitos especificamente para este fim.

A eliminação destes valores diminuiu de três para dois o número de corpos de prova usados para a definição de cada ponto nos gráficos referentes aos ensaios de tração. Estes gráficos confrontam a temperatura do molde, temperatura de vazamento do metal e a pressão usada no vazamento, dando, assim, uma noção da influência destas variáveis na resistência à tração dos corpos de prova.

Na parte superior da figura 34 aparecem os resultados médios dos ensaios de tração realizados, nos corpos de prova obtidos, usando-se os moldes aquecidos a uma temperatura de 200°C e variando a temperatura de vazamento do metal e o método de vazamento.

Observa-se neste gráfico que todos os valores médios obtidos estão acima da linha horizontal referente a 230 MPa que é o valor mínimo admissível, segundo a norma AMS 4260 C, para a liga de alumínio 356, no estado T6.

Levando-se em conta os valores obtidos e o valor mínimo estipulado, pode-se dizer que o tratamento térmico, ao qual foram submetidos os corpos de prova, atingiu seus objetivos.

Analisando as curvas da parte superior desta figura, constata-se o melhor desempenho do método de vazamento contra gravidade sobre o método convencional. A análise permite dizer ainda que, no método contra gravidade, o uso de pressões mais elevadas,

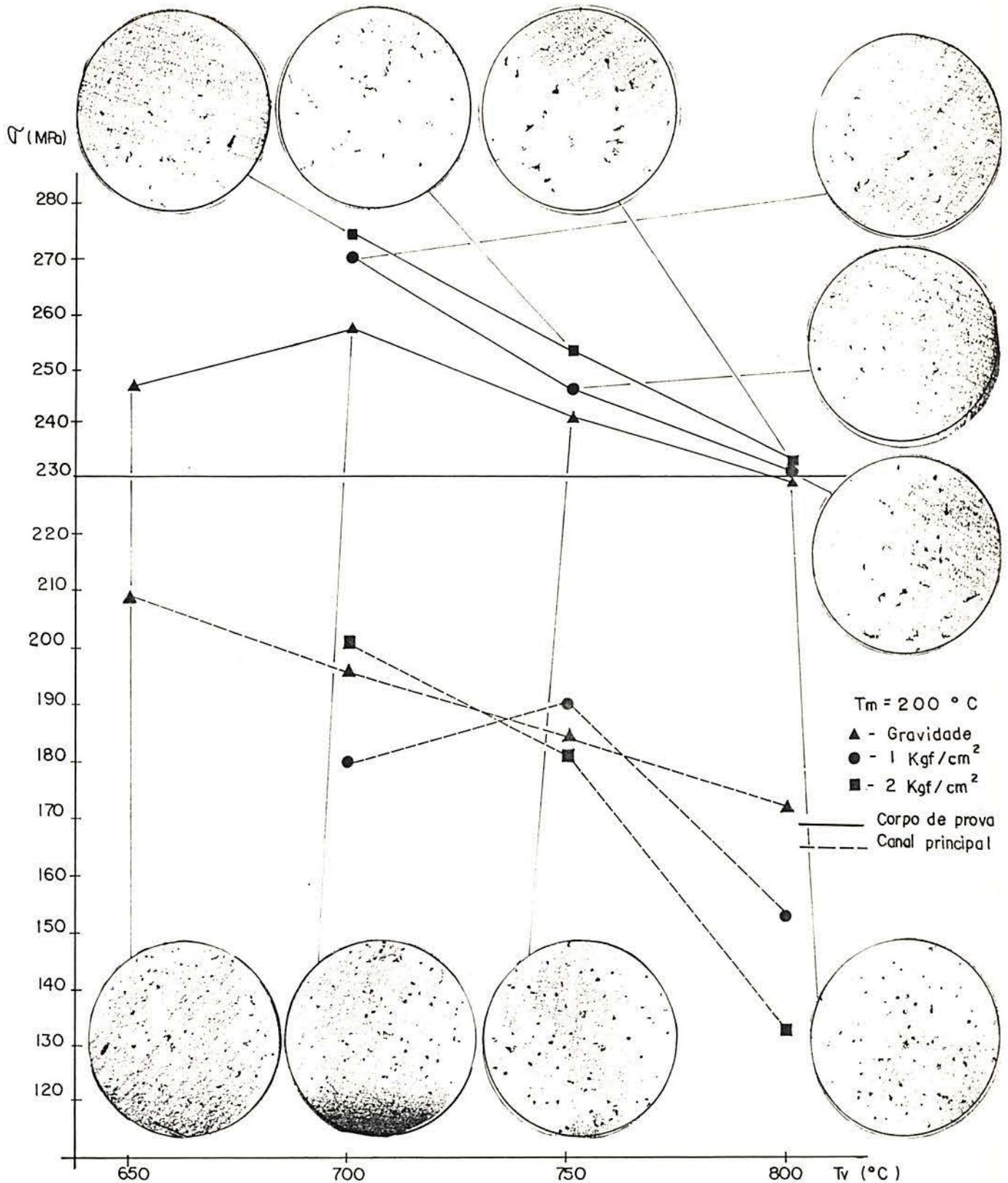


Fig.34 - Gráfico dos valores obtidos nos ensaios de tração para a tensão de ruptura com relação à temperatura de vazamento do metal para os três processos de vazamento. Nestes experimentos os moldes foram pre-aquecidos a 200° C e os corpos de prova estão no estado T6

produz resultados mais satisfatórios.

Tomando-se como referência a temperatura de vazamento de 700°C , onde todas as curvas registram seu maior valor, nota-se que para o processo contra gravidade, que usou 2kgf/cm^2 de pressão, a melhora obtida na resistência à tração foi de 6,20% sobre o processo convencional, enquanto que, ao utilizar-se a pressão de 1kgf/cm^2 , o aumento foi de 4,67%. Esses resultados vêm ao encontro do que se esperava e ao que a literatura menciona a respeito das vantagens do método contra gravidade.

Ainda analisando a figura 34, constata-se um decréscimo acentuado na resistência à tração, à medida que se eleva a temperatura de vazamento, provocando uma aproximação entre as três curvas e estas ao valor mínimo exigido, diminuindo assim a vantagem do uso do método contra gravidade.

Supondo-se que o comportamento das curvas referentes ao método contra gravidade seja o mesmo do método convencional para a temperatura de vazamento 650°C , pode-se dizer que a temperatura ideal para o vazamento da liga 356, no que se refere à resistência à tração, está em torno de 700°C .

Passando-se, agora, às análises da figura 35, que representa os resultados obtidos com os corpos de prova que foram fundidos com os moldes aquecidos a 300°C .

Neste gráfico foi possível registrar os valores referentes aos vazamentos feitos com a temperatura de 650°C , para o processo contra gravidade, usando 2kgf/cm^2 de pressão.

Com a obtenção deste ponto, ficou mais evidente a suposição feita anteriormente para a figura 34, referente ao comportamento da resistência à tração, a qual segue o formato da curva

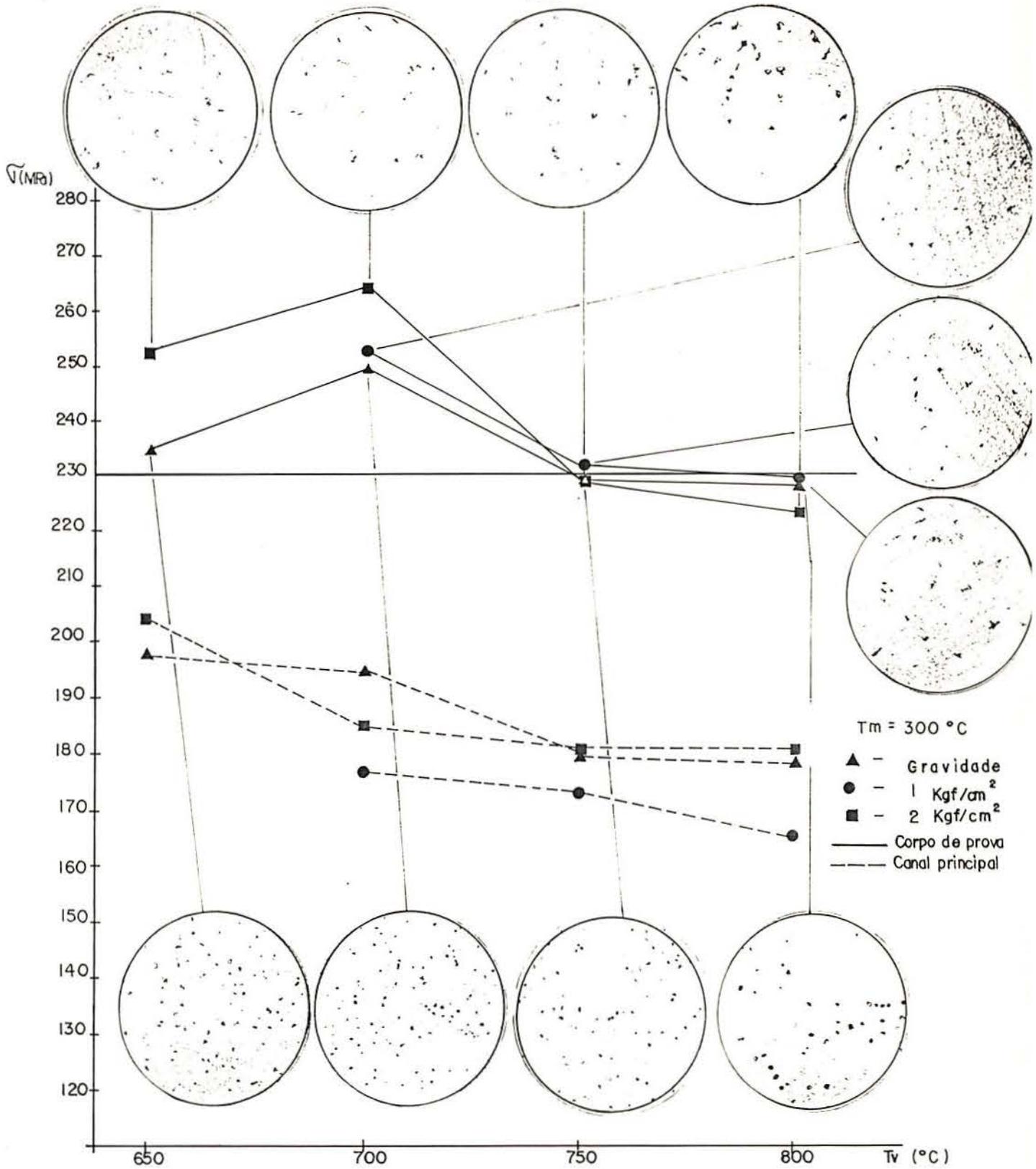


Fig. 35 - Gráfico dos valores obtidos nos ensaios de tração para a tensão de ruptura com relação à temperatura de vazamento do metal para os três processos de vazamento. Nestes experimentos os moldes foram pre-aquecidos a 300° C e os corpos de prova estão no estado T6

referente ao processo convencional.

Com esta constatação, pode-se confirmar, também para este caso, que a temperatura de vazamento da liga 356 está mesmo ao redor de 700°C , pois a mudança da temperatura no molde, o ponto de maior valor para curvas se manteve nesta temperatura.

Analisando o incremento na resistência à tração devido ao uso de pressão adicional durante a solidificação, observa-se para este gráfico, uma melhora de 5,82%, usando-se 2kgf/cm^2 e 1,42% quando a pressão usada foi 1kgf/cm^2 .

Nota-se ainda, na figura 35, uma rápida queda nos valores da resistência à tração à medida que vai aumentando a temperatura de vazamento, chegando ao ponto de atingir a linha limite de 230 MPa, para temperaturas de vazamento entre 750°C e 800°C .

Confrontando-se as figuras 34 e 35, vê-se claramente o melhor desempenho dos resultados obtidos quando os moldes são aquecidos a temperatura mais baixa. Fato este que está de acordo com a teoria e que também dá maior respaldo aos experimentos realizados. Outra constatação que se pode tirar nesta análise é a coerência dos resultados no que se refere aos melhores resultados obtidos, pois estes estão ao redor da mesma temperatura de vazamento, como já foi dito quando da análise individual dos gráficos.

A partir desta informação, montou-se um gráfico de barra da figura 36, onde se podem comparar todos os resultados obtidos nos testes de tração para a temperatura de vazamento a 700°C . Nesta comparação, pode-se constatar, claramente, a influência da temperatura do molde sobre a resistência à tração das peças bem como da influência da pressão, durante o período de solidificação do metal, com referência à mesma propriedade.

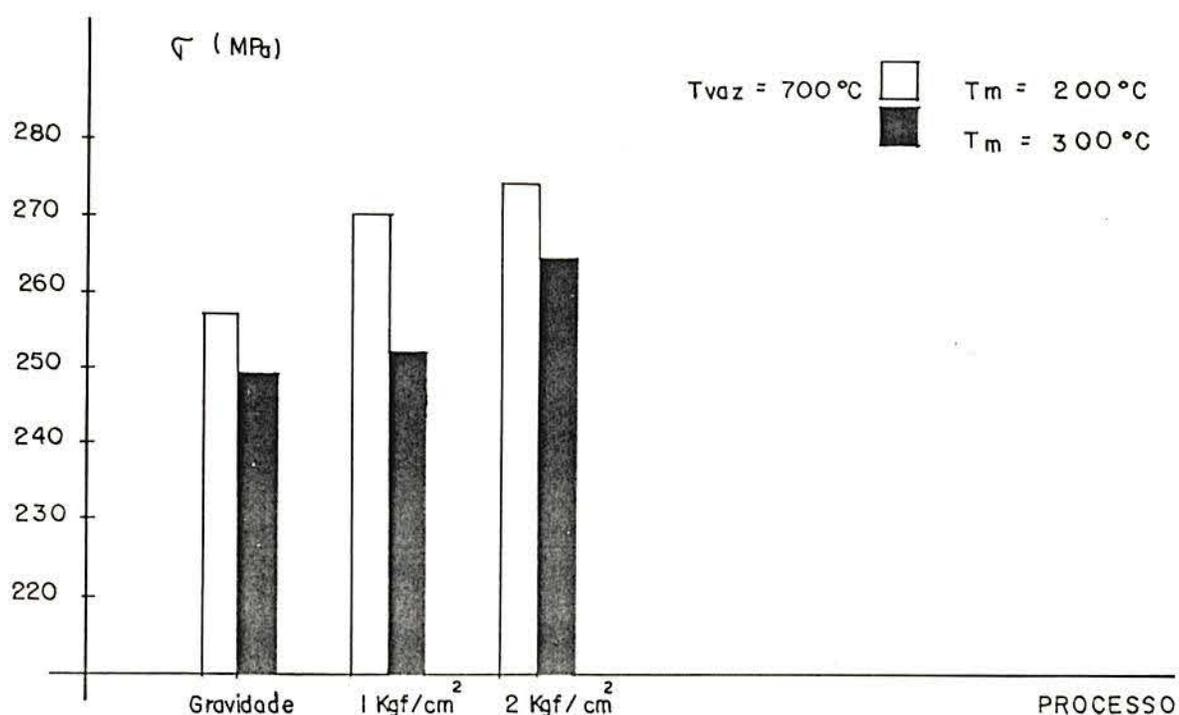


Fig. 36 - Gráfico de barras feito para a temperatura de vazamento de 700°C onde se comparam o desempenho dos processos usados e a temperatura dos moldes

Voltando a analisar as figuras 34 e 35, percebe-se, apesar do número reduzido de testes usados para obtenção das curvas, que estas possuem uma forma padrão de comportamento, podendo-se dizer que todos os experimentos foram realizados com a mesma metodologia e que estas curvas representam o comportamento da resistência à tração da liga 356, no estado T6, levando-se em conta a temperatura de vazamento, temperatura do molde e uso ou não da pressão adicional, durante a solidificação.

No Apêndice, são apresentadas separadamente todas as curvas obtidas nos ensaios de tração, onde é possível observar a dispersão de cada ponto, bem como pode ser vista uma tabela com todos os resultados obtidos nos ensaios e que deram origem aos gráficos apresentados.

Ainda, no que se refere aos ensaios de tração, constatou-se que o tipo de ruptura ocorrido nos corpos de prova, foram todos com superfície plana e horizontal, sem que ocorresse extricação próximo à região de ruptura. Esta constatação pode ser verificada na figura 37, onde podem ser vistos dois corpos de prova rompidos.

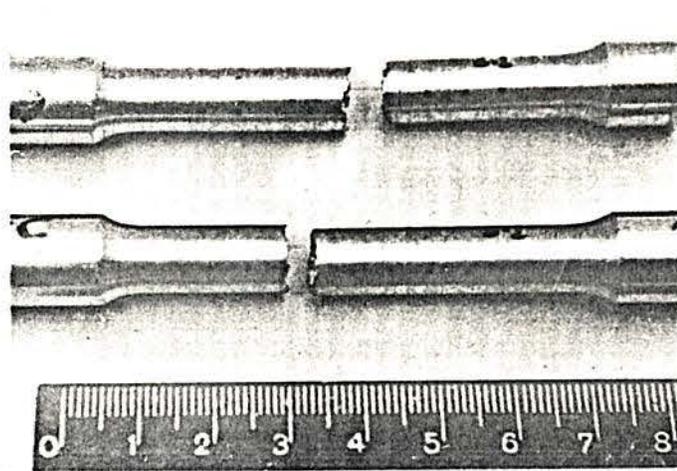


Fig. 37 - Corpos de prova rompidos, onde se nota a fratura do tipo plana e sem extricação, característica de materiais fracos

Este tipo de ruptura era esperado para a liga 356, no estado T6, pois nestas condições a liga é considerada frágil, e para este tipo de material a ruptura plana, horizontal e sem extricação, é uma característica esperada.

4.3 - RESULTADOS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

A primeira constatação feita analisando os resultados obtidos nos ensaios, foi o fato de nenhum desses valores obtidos terem atingido o valor teórico de $2,663\text{g/cm}^3$, citado pela literatura⁽⁹⁾ como sendo a densidade da liga 356. Apesar disto, com os

resultados obtidos, foi possível fazer a comparação entre os métodos de vazamento e pode-se caracterizar claramente qual deles foi o método mais eficiente, como é o intuito deste trabalho.

Na figura 38, pode-se observar, nitidamente, o melhor desempenho do método de vazamento contra gravidade sobre o método convencional de vazamento. A utilização dos processos contra gravidade, tanto usando 1kgf/cm^2 como 2kgf/cm^2 , provocam um aumento médio de aproximadamente $0,014\text{g/cm}^3$, na densidade, quando se analisam os vazamentos feitos com os moldes aquecidos a temperatura de 200°C ;

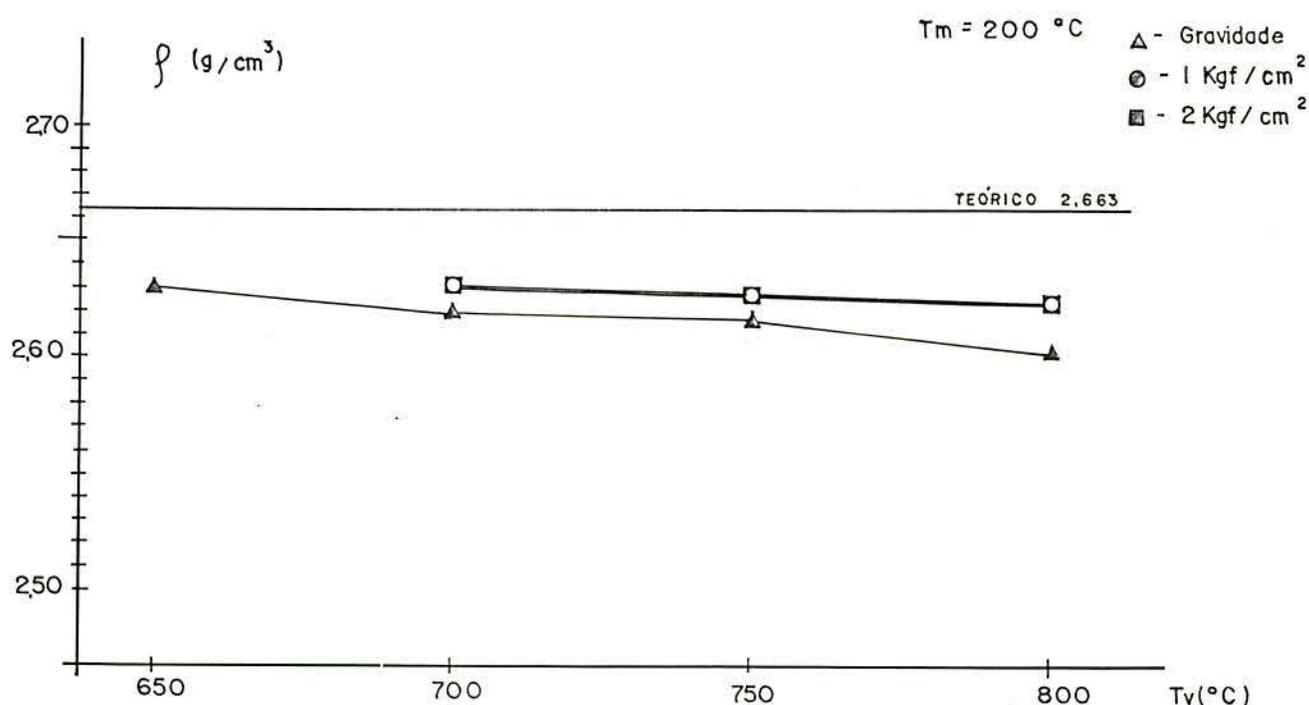


Fig. 38 - Gráfico da densidade para os corpos de prova a partir de moldes aquecidos a 200°C onde variaram as temperaturas e os processos de vazamento, comparados ao valor teórico, após o tratamento térmico T6

Neste gráfico pode-se observar ainda, que os resultados obtidos pelo processo contra gravidade são muito próximos, tanto que suas linhas se confundem em vários pontos. Com isso, constata-

se que a variação de kgf/cm^2 , ocorrida entre o processo convencional e o processo contra gravidade, provoca um aumento na densidade. Porém, quando se aumenta a pressão em mais de kgf/cm^2 no processo contra gravidade, o aumento esperado não ocorre e os resultados mantêm-se em torno dos obtidos com o uso de kgf/cm^2 . Esses resultados induzem a dizer que o uso da pressão durante o vazamento e a solidificação, no que se refere ao aumento de densidade, é significativo quando a pressão usada vai da pressão atmosférica até kgf/cm^2 .

Analisando-se, agora, a figura 39 que representa os vazamentos feitos nos moldes a 300°C , nota-se que o comportamento das curvas têm a mesma tendência do gráfico da figura 38, e é visível o melhor desempenho do processo contra gravidade sobre o processo convencional, propiciando um aumento médio de $0,021\text{g/cm}^3$, na densidade.

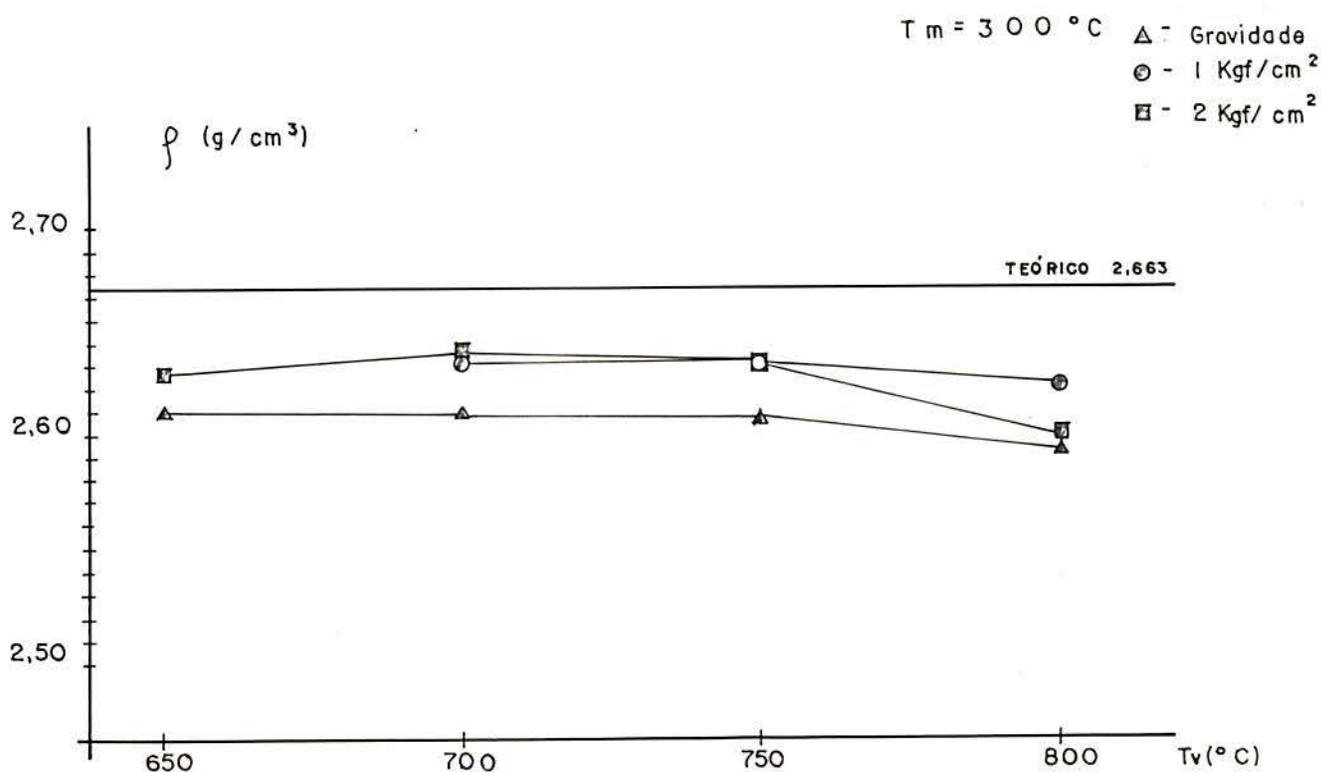


Fig.39 - Gráfico da densidade para os corpos de prova obtidos a partir de moldes aquecidos a 300°C , onde variaram as temperaturas e os processos de vazamentos, comparados ao valor teórico após o tratamento térmico T6

Neste gráfico percebe-se que a pressão aplicada no processo de vazamento contra gravidade é mais significativo até..... 1kgf/cm^2 , não se justificando o uso de pressões mais elevadas quando se procuram melhores resultados para a densidade.

Pode-se observar, na figura 39, uma queda brusca no valor da densidade para os corpos de prova vazados pelo processo contra gravidade com o uso de 2kgf/cm^2 de pressão e temperatura de vazamento de 800°C . Este fato vem dar respaldo aos resultados dos ensaios de tração, pois estes corpos de prova obtiveram valores bem abaixo dos esperados para este teste.

Nas figuras 38 e 39, é possível observar que as curvas têm a mesma tendência de diminuir seus valores à medida que a temperatura de vazamento vai aumentando. Este comportamento é previsível, pois a literatura⁽⁹⁾ consultada para a elaboração do item 2 deste trabalho, diz que ao aumentar-se a temperatura de vazamento, aumenta-se a tendência de absorção de gases para o alumínio e suas ligas.

O fato de nenhum dos valores obtidos nos ensaios tenham se aproximado mais do valor teórico, deve-se às condições em que os experimentos, para a obtenção dos corpos de prova, foram realizados e que poderão ser mais facilmente visualizados quando da análise do nível de porosidade. A eliminação dos valores obtidos nos corpos de prova derivados dos canais principais, se deu pelo mesmo motivo apresentado no item anterior, justificando assim a explicação dada anteriormente. Os valores da densidade para estes corpos de prova sempre foram mais baixos que os demais, comprovando, assim, a existência de um maior número de poros, provocando nestes uma menor resistência à tração.

Os gráficos com as dispersões ocorridas na confecção das

curvas dos gráficos das figuras 38 e 39 podem ser vistos no Apêndice deste trabalho, onde todas as curvas são mostradas separadamente, junto com uma tabela contendo todos os valores levantados durante os ensaios.

4.4 - AVALIAÇÃO QUALITATIVA DO NÍVEL DE POROSIDADE NOS CORPOS DE PROVA

A avaliação do nível de porosidade feita, nos corpos de prova, revelou um índice elevado de pequenos poros que se distribuem uniformemente pela superfície seccionada e analisada. Este elevado número de poros pode estar ligado a duas causas: ao local onde foi feita a secção para a análise e ou o uso inadequado do desgaseificante.

O fato da secção analisada estar próxima do canal de alimentação da peça, que, por sua vez, também serve de pescoço de massalote, que é o canal principal, atrai para sua proximidade uma maior quantidade de poros, justificando, assim, uma concentração elevada de poros nesta região. Esta hipótese está de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de tração, pois estes são elevados e com isto justificam, de certa forma, o mecanismo de atração dos poros para a extremidade dos corpos de prova, deixando assim, uma região central mais compacta, propiciando os bons resultados para este ensaio.

O outro ponto causador de elevado número de pequenos poros pode estar vinculado ao uso de pastilhas de hexacloretano, para a desgaseificação, contendo grande teor de umidade. O elevado teor de umidade está associado à má estocagem das pastilhas e a não colocação das mesmas em estufa para a desumidificação, antes do uso nos experimentos.

Este descuido no trato das pastilhas pode ter introduzido hidrogênio, no banho de metal, o que durante a solidificação provoca o aparecimento de pequenos poros, uniformemente distribuídos, na peça.

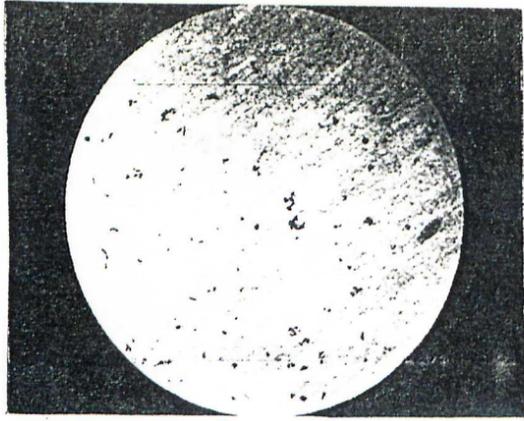
O grande número de poros encontrados, confirma os resultados obtidos nos ensaios para a determinação da densidade, onde os mesmos estão abaixo do valor estipulado teoricamente para liga 356.

Levando em conta que a escolha da secção a ser analisada não foi muito adequada, pois esta é uma região propensa ao aparecimento de poros, é visível a diferença entre os corpos de prova obtidos pelo método de vazamento contra gravidade e o método convencional.

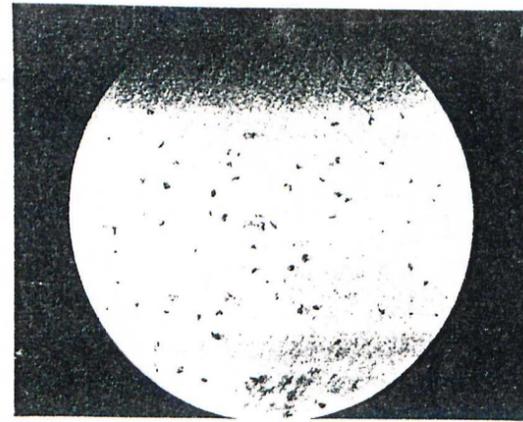
Na figura 40 é possível constatar estas observações, comparando-se as fotos da primeira linha, que corresponde ao processo convencional, com as fotos da segunda e terceira linha, que correspondem ao processo contra gravidade, onde foram usadas as pressões de 1kgf/cm^2 e 2kgmf/cm^2 , respectivamente. Fica claro que o número de poros encontrados nas fotos da primeira linha é maior que nas demais.

Outra forma de se analisar a superioridade do método contra gravidade sobre o método convencional é compararem-se as fotos de uma mesma coluna, pois vê-se a diferença na quantidade de poros, quando se usa a mesma temperatura de vazamento, mudando apenas o método de vazamento. Nesta comparação, observa-se facilmente que o número de poros diminui de cima para baixo, dando credibilidade, assim, aos dados obtidos na avaliação da densidade.

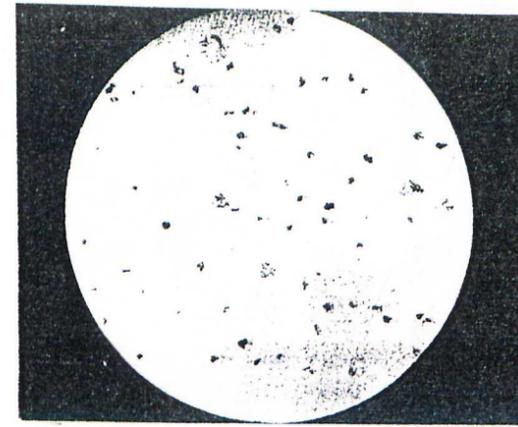
A análise da figura 41 comprova todas as constatações



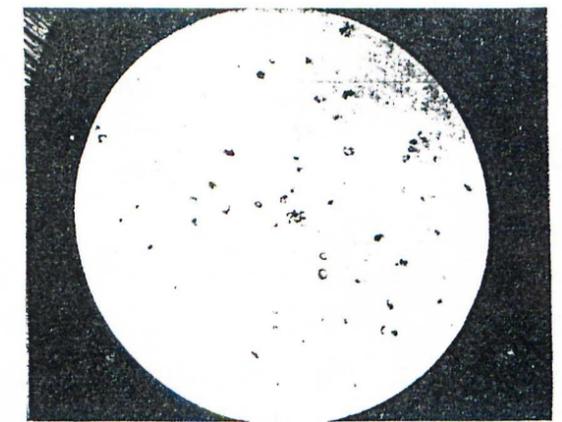
Gravidade TV-650°C
 $\rho = 2,630 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 247,2 \text{ MPa}$



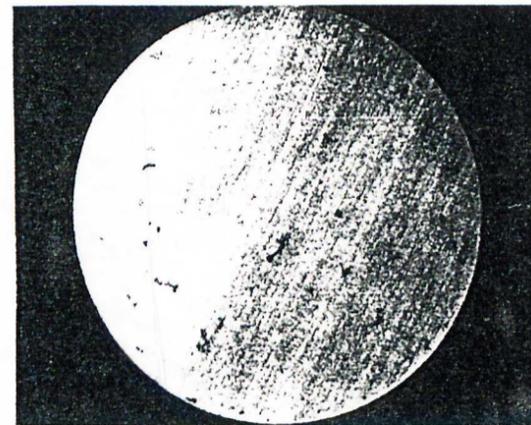
Gravidade TV-700°C
 $\rho = 2,619 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 257,0 \text{ MPa}$



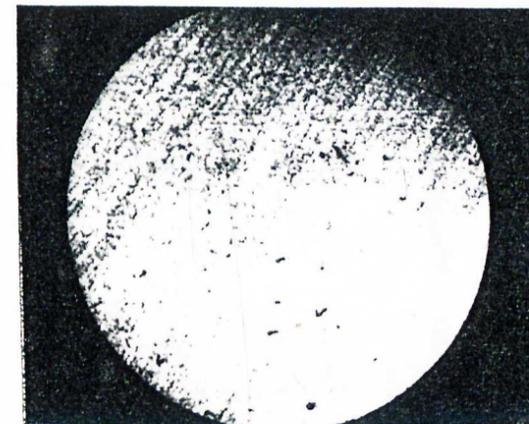
Gravidade TV-750°C
 $\rho = 2,614 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 241,2 \text{ MPa}$



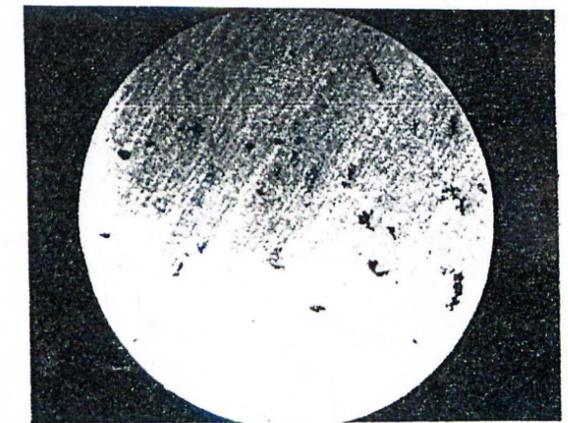
Gravidade TV-800°C
 $\rho = 2,602 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 229,8 \text{ MPa}$



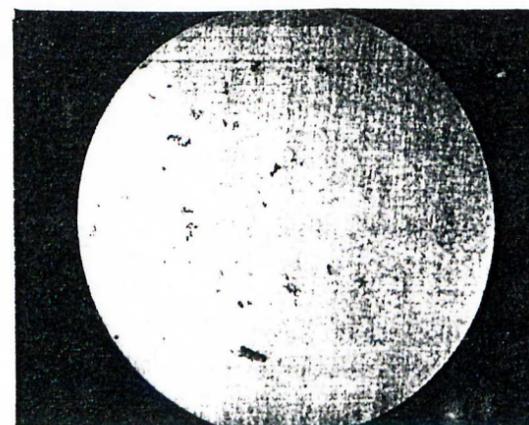
1kgf/cm² TV=700°C
 $\rho = 2,631 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 269,6 \text{ MPa}$



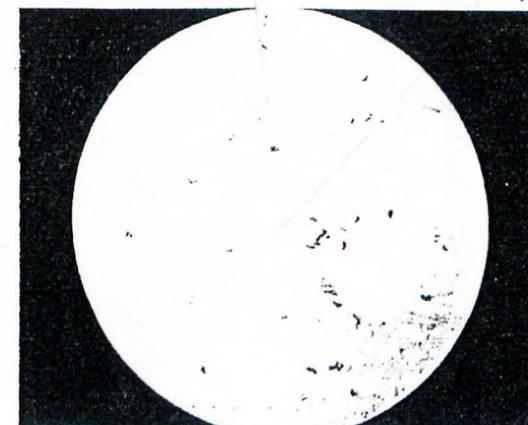
1kgf/cm² TV=750°C
 $\rho = 2,628 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 245,9 \text{ MPa}$



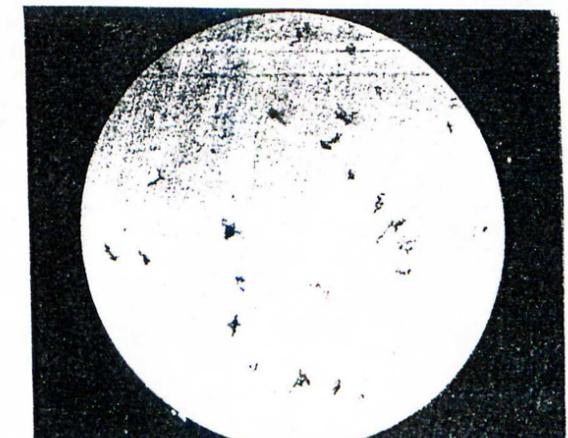
1kgf/cm² TV=800°C
 $\rho = 2,623 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 231,4 \text{ MPa}$



2kgf/cm² TV=700°C
 $\rho = 2,631 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 274,0 \text{ MPa}$



2kgf/cm² TV=750°C
 $\rho = 2,626 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 252,7 \text{ MPa}$



2kgf/cm² TV=800°C
 $\rho = 2,621 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 233,4 \text{ MPa}$

Fig. 40 - Fotos tiradas para análise do nível de porosidade nos corpos de prova obtidos com os moldes aquecidos a 200°C onde se pode ver o maior ou menor número de poros, conforme os processos de vazamento e a temperatura de vazamento usada para o metal. Aumento 4,5 vezes

feitas para a figura 40, sendo que a diferença entre ambas está; apenas, na temperatura de pré aquecimento do molde. Para a figura 40 a temperatura usada foi de 200°C e para a figura 41 os moldes foram aquecidos a 300°C.

Comparando as figuras 40 e 41, pode-se dizer que o aumento de 100°C na temperatura do molde causa uma pequena variação no número de poros encontrados; embora esta constatação seja verdadeira, é preciso prestar bastante atenção nas fotos, pois a diferença é muito pequena.

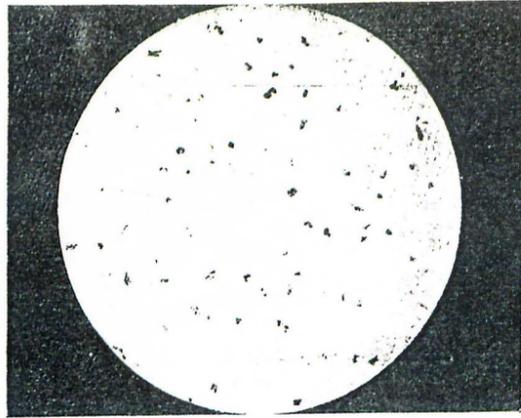
Outra constatação que se pode tirar da análise das duas figuras é o evidente aumento do número e do tamanho das porosidades à medida que a temperatura vai aumentando, independente do método usado.

4.5 - RESULTADOS DOS TESTES DE DUREZA

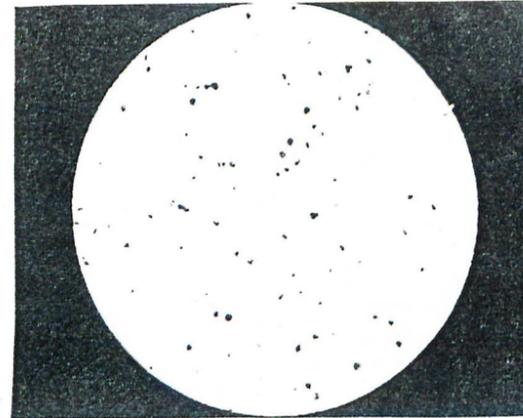
Após a realização dos testes de dureza em todos os corpos de prova, fez-se a avaliação dos resultados obtidos, onde ficou clara a eficiência do tratamento térmico realizado, visto o elevado valor encontrado nos testes, comparados com o valor de 60HB, referido pela norma AMS 4260 C, para a liga 356.

Os resultados dos testes foram agrupados em dois gráficos, um para os corpos de prova obtidos a partir dos moldes aquecidos a 200°C e outro para moldes a 300°C, onde a dureza Brinell foi posta em função da temperatura de vazamento do metal.

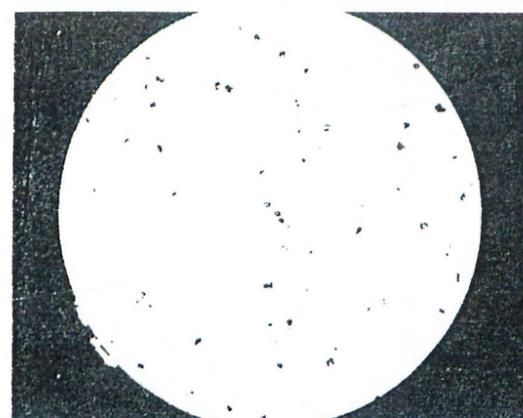
Para o gráfico da figura 42, observa-se com grande clareza o melhor desempenho do processo de vazamento contra gravidade sobre o processo convencional. Como exemplo disto pode-se usar o melhor resultado obtido pelo método convencional, que foi de



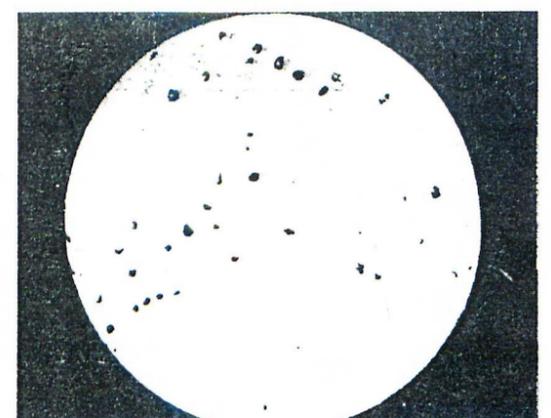
Gravidade TV-650°C
 $\rho = 2,612 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 234,6 \text{ MPa}$



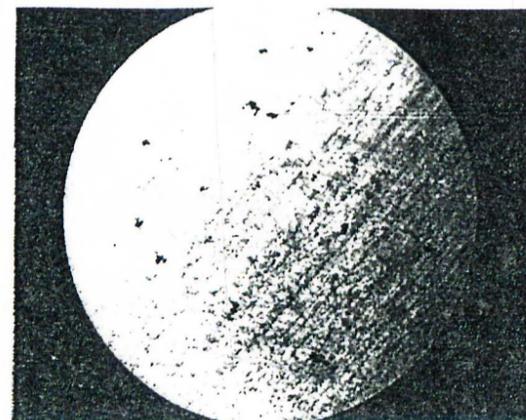
Gravidade TV-700°C
 $\rho = 2,609 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 249,0 \text{ MPa}$



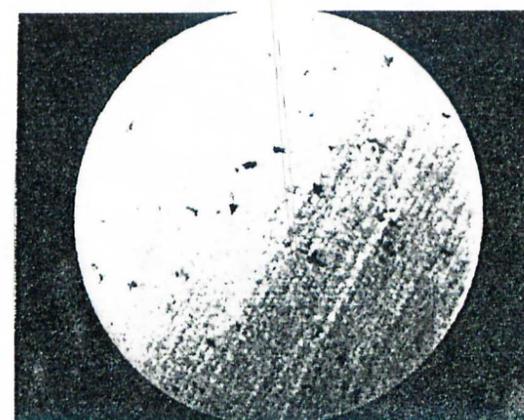
Gravidade TV-750°C
 $\rho = 2,607 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 229,1 \text{ MPa}$



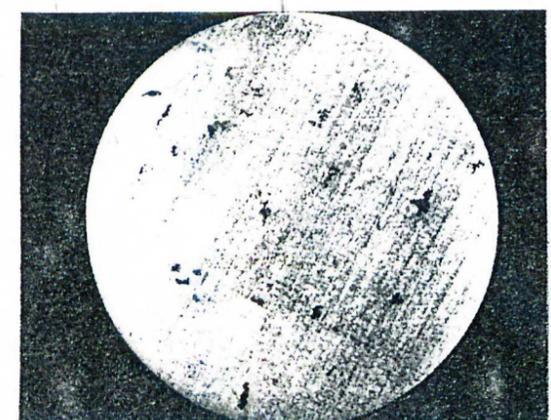
Gravidade TV-800°C
 $\rho = 2,592 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 228,3 \text{ PMA}$



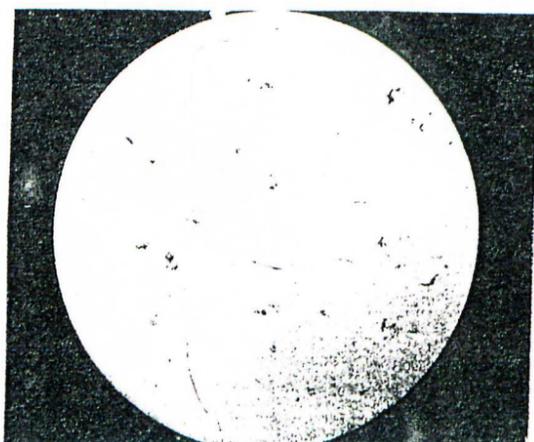
1kgf/cm² TV-700°C
 $\rho = 2,631 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 252,6 \text{ MPa}$



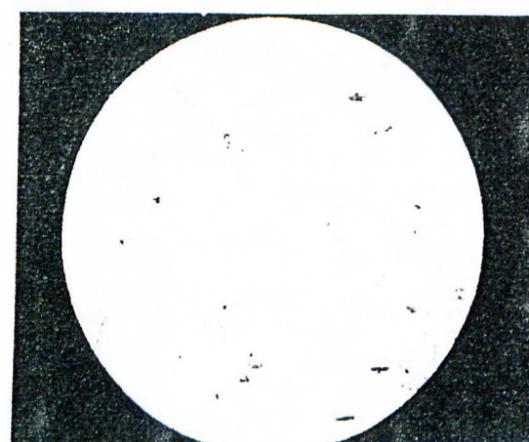
1kgf/cm² TV-750°C
 $\rho = 2,631 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 231,4 \text{ MPa}$



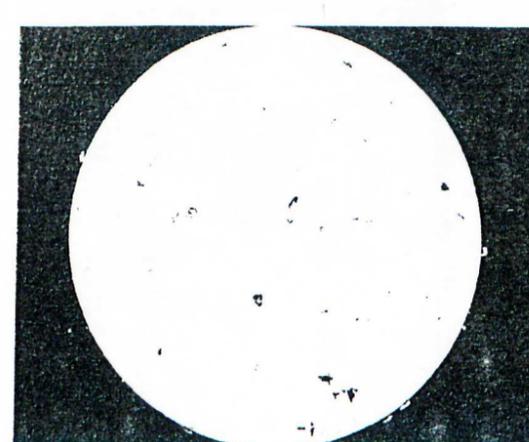
1kgf/cm² TV-800°C
 $\rho = 2,622 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 229,1 \text{ MPa}$



2kgf/cm² TV-650°C
 $\rho = 2,627 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 252,4 \text{ MPa}$



2kgf/cm² TV-700°C
 $\rho = 2,635 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 264,4 \text{ MPa}$



2kgf/cm² TV-750°C
 $\rho = 2,630 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 228,7 \text{ MPa}$



2kgf/cm² TV-800°C
 $\rho = 2,598 \text{ g/cm}^3$
 $\sigma = 223,4 \text{ MPa}$

Fig. 41 - Fotos tiradas para análise do nível de porosidade nos corpos de prova obtidos com os moldes aquecidos a 300°C, onde se pode ver o maior ou menor número de poros conforme o processo de vazamento e a temperatura de vazamento usada para o metal. Aumento 4,5 vezes.

95,21 HB para o vazamento feito a 650°C e o pior resultado alcançado pelo método contra gravidade, que foi de 98,60 HB, para a temperatura de vazamento de 700°C e pressão aplicada de 1kgf/cm², o que prova que o novo método é mais eficiente, quando se analisa a dureza.

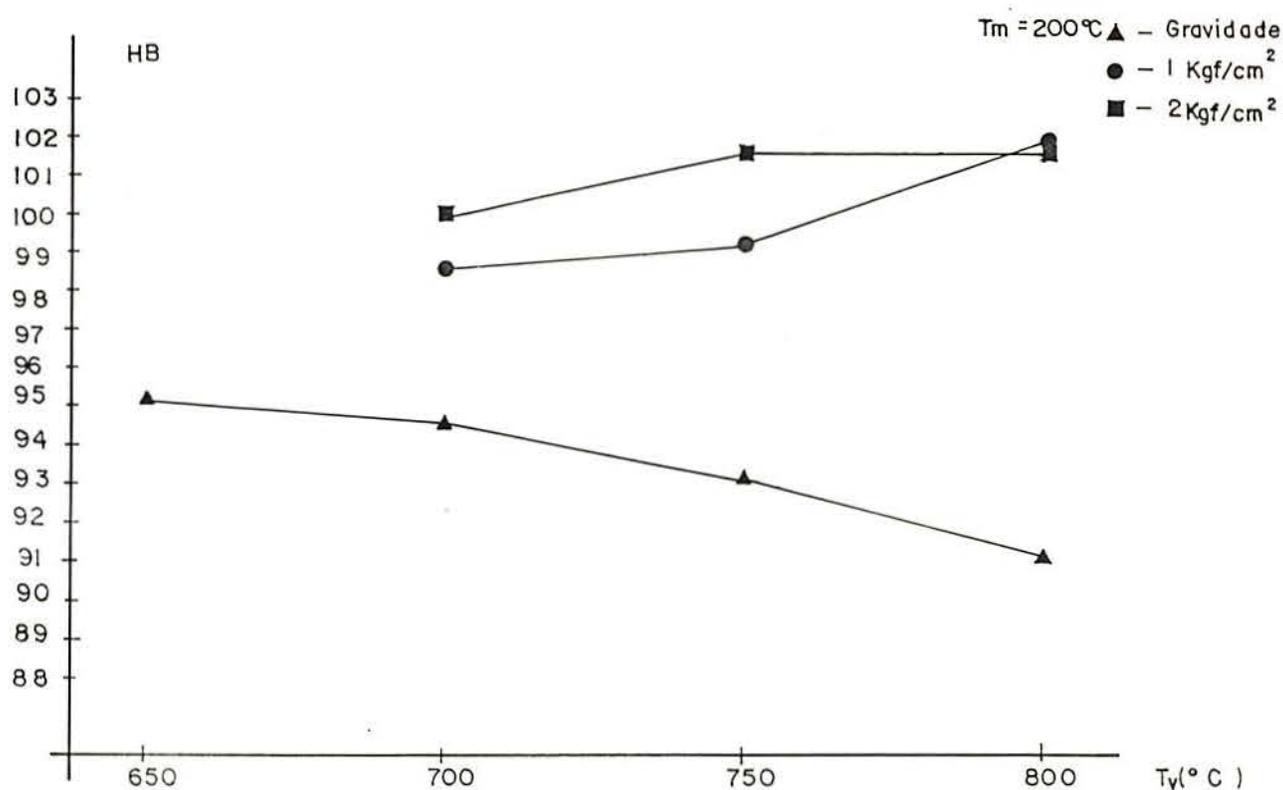


Fig. 42 - Gráfico obtido a partir dos resultados dos ensaios de dureza Brinell, onde se relaciona a dureza com a temperatura de vazamento do metal para os três processos de vazamento, usando moldes pré-aquecidos a 200°C. Resultados após o tratamento térmico T6

É possível notar neste gráfico que os valores obtidos nos processos contra gravidade são bem próximos entre si, permitindo dizer que os efeitos da solidificação sob a ação da pressão são mais eficazes, em pressões até 1kgf/cm², pois, se assim não fosse, o uso de uma pressão de 2kgf/cm², que representa o dobro da pressão e equivale aproximadamente a 7,4m de coluna de metal, deveria

produzir resultados bem mais expressivos do que os registrados nos testes de dureza, feitos nos corpos de prova vazados com esta pressão.

Prosseguindo na análise das curvas, nota-se que nos processos contra gravidade, estas possuem a tendência de aumentar o valor da dureza, à medida que a temperatura de vazamento aumenta, enquanto para o processo convencional a tendência é contrária, ou seja, à medida que a temperatura de vazamento aumenta, o valor da dureza diminui.

Segundo a literatura, o comportamento da curva do processo convencional é o correto, pois com o aumento da temperatura de vazamento do metal, a velocidade de solidificação passa a ser menor, desde que sejam mantidas fixas as outras variáveis, provocando o aparecimento de uma estrutura granular mais grosseira e, em consequência disto, uma dureza mais baixa.

O comportamento fora de esperado para os processos contra gravidade, deve estar associado à ação da pressão durante a solidificação dos corpos de prova.

Analisando, agora, a figura 43, percebe-se que o comportamento das curvas é o mesmo das curvas da figura anterior. Este comportamento dá respaldo ao que foi comentado anteriormente, a respeito do melhor processo, da influência da pressão nos resultados e do comportamento diferente das curvas para cada método.

Ao se fazer a comparação entre os valores das curvas das duas figuras, percebe-se uma pequena superioridade nos resultados da figura 42, onde os experimentos foram feitos com o molde a temperatura mais baixa, confirmando assim a influência da velocidade de solidificação sobre a dureza dos corpos de prova.

No apêndice são mostrados separadamente todas as curvas obtidas, com sua dispersão e uma tabela com todos os valores obtidos durante os ensaios.

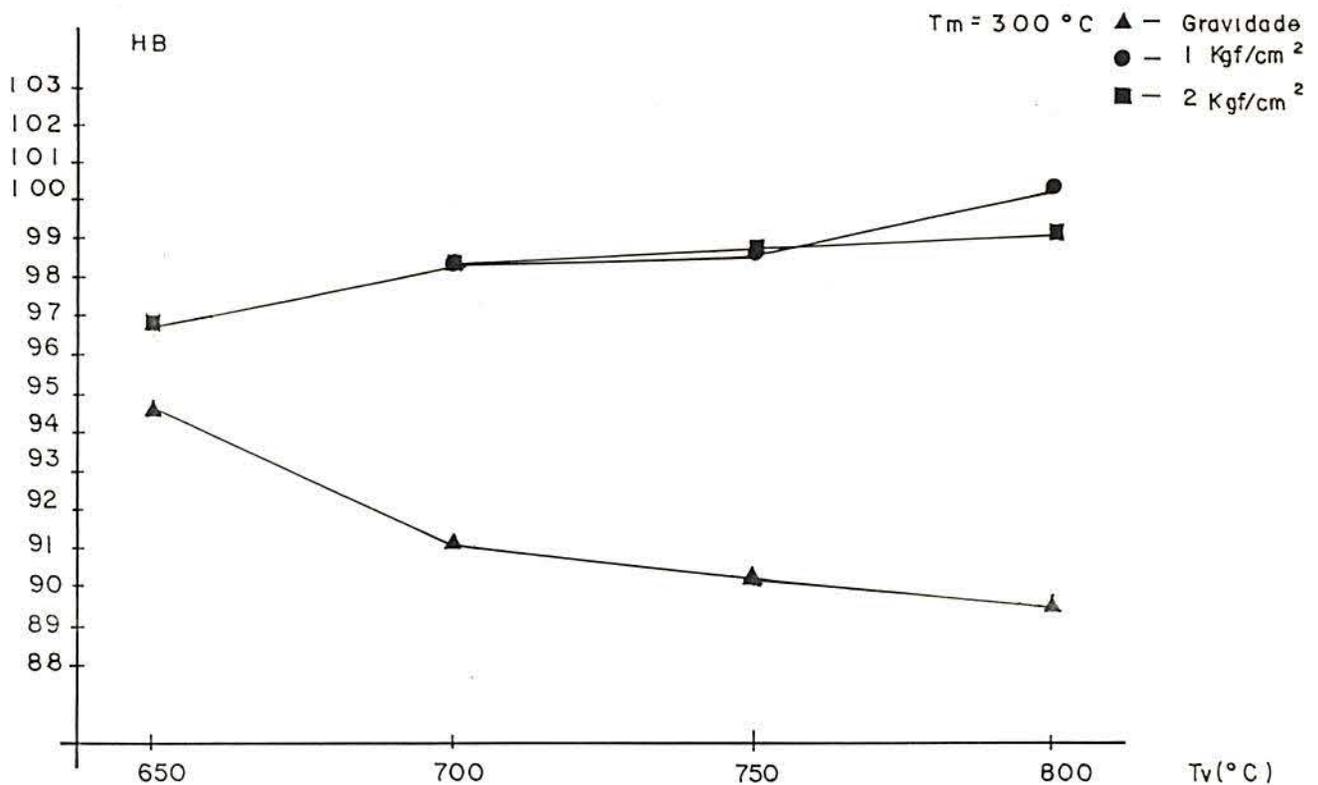


Fig. 43 - Resultados dos ensaios de dureza Brinell onde se relacionam a dureza com a temperatura de vazamento do metal, para os três processos de vazamento, usando-se moldes pré-aquecidos a 300°C . Resultados após o tratamento térmico T6

4.6 - MICROGRÁFICA DOS CORPOS DE PROVA

Com o término da etapa de polimento, faz-se uma análise da microestrutura para todos os corpos de prova, com o intuito de se ter uma idéia do comportamento desta após o tratamento térmico T6.

A primeira constatação a que se chegou após as observações foi a de que todos os corpos de prova analisados possuem a

microestrutura semelhante descrita pela literatura⁽⁹⁾ para peças feitas de liga 356, no estado T6.

Esta constatação vem a confirmar as observações feitas, anteriormente, nos itens que tratam sobre os testes de tração e dureza, onde os resultados obtidos induziam a concluir-se sobre a eficiência do tratamento térmico.

Nas figuras 44 e 45 pode-se observar claramente a diferença estrutural entre os corpos de prova no estado bruto de fusão e no estado de tratamento térmico T6.

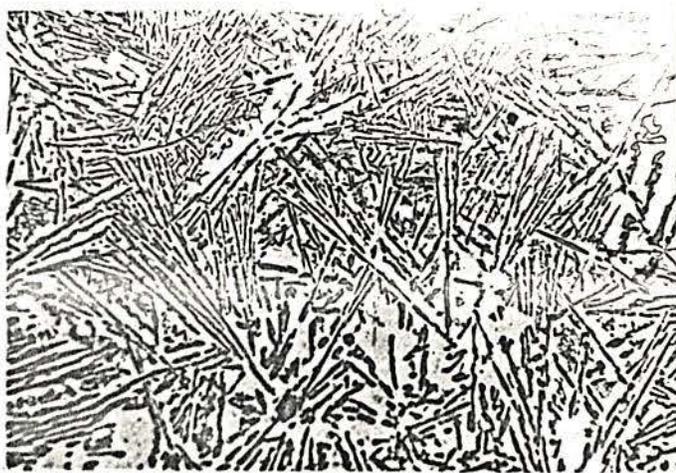


Fig. 44 - Microestrutura da liga 356 bruta de fusão onde se pode ver a matriz de alumínio mais clara e o silício mais escuro em forma de agulhas. Corpo de prova sem ataque. Aumentado 150 vezes



Fig. 45 - Microestrutura da liga 356 no estado T6 onde se pode ver a matriz de alumínio mais clara e o silício mais escuro todo fragmentado e globolizado no contorno de grão. Corpo de prova sem ataque. Aumentado 150 vezes

Na foto da figura 44, é visível o grande número de agulhas de silício espalhadas na matriz de alumínio, fazendo com que os corpos de prova apresentem baixa resistência à tração e dureza. Na foto da figura 45, é possível observar-se que houve uma quebra das agulhas proporcionando a formação de pequenos fragmentos com cantos e pontas arredondadas ou mesmo a globalização destes fragmentos, conferindo melhores propriedades aos corpos de prova.

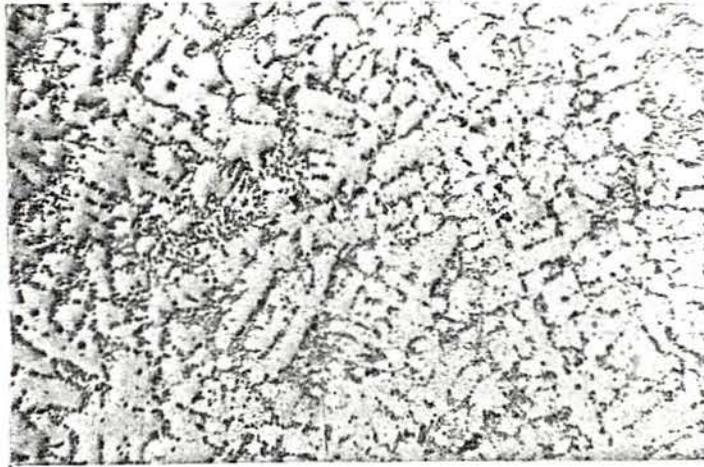
Outra constatação feita, diz respeito ao comportamento do tratamento térmico com referência à temperatura de vazamento usada. Percebe-se nos corpos de prova onde a temperatura foi mais elevada, que os efeitos de tratamento térmico não foram tão eficientes quanto nos corpos de prova vazados a temperaturas mais baixas.

Devido à alta temperatura de vazamento, a estrutura acicular do silício torna-se maior e mais grosseira, exigindo um maior tempo na fase de solubilização para que ocorra uma maior fragmentação das partículas do silício.

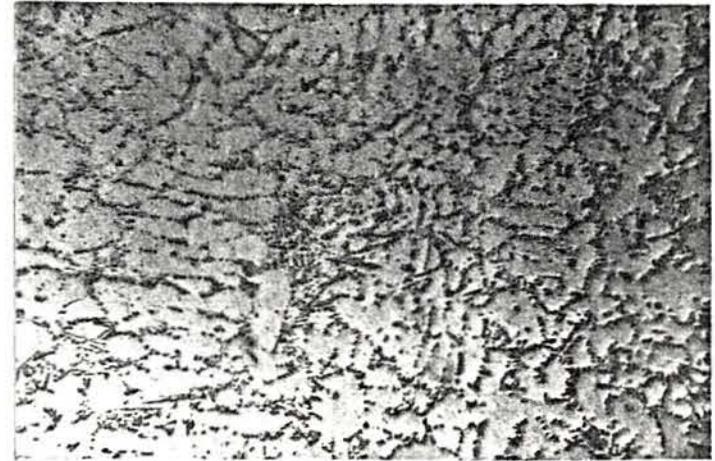
Esta diferença pode ser vista na seqüência da figura 46, onde os efeitos da temperatura de vazamento sobre a microestrutura podem ser vistos. Esta pequena diferença encontrada pode ser justificada, levando-se em conta o que foi mencionado anteriormente, considerando-se que os experimentos foram feitos usando-se o mesmo tempo de solubilização para todos os corpos de prova.

Na análise feita, não foi possível constatar alterações na microestrutura causadas pela diferença de pressão usada nos vazamentos. Foi constatado, sim, uma variação mínima na microestrutura provocada pela diferença de temperatura usada nos moldes, sendo que, em alguns casos, esta diferença não é percebida.

Figs. 46 - Sequência de fotos onde foi variada a temperatura de vazamento do metal e pode-se ver a melhor eficiência do tratamento térmico nas temperaturas de vazamento mais baixas. Corpos de prova sem ataque e aumento de 150 vezes



$T_v = 650^{\circ}\text{C}$



$T_v = 700^{\circ}\text{C}$



$T_v = 750^{\circ}\text{C}$



$T_v = 800^{\circ}\text{C}$

C O N C L U S Õ E S

Os resultados obtidos a partir dos experimentos propiciaram a comparação dos dois processos de vazamento para o método de fundição de precisão, justificando assim a proposta inicial deste trabalho. As conclusões que se pode tirar após a análise dos resultados são:

1 - No processo de vazamento contra gravidade, deve-se ter muito cuidado com a geometria usada para a montagem do cacho em cera, pois esta pode provocar o surgimento de zonas de contra-pressão que dificultam o enchimento do molde cerâmico quando do vazamento.

2 - A permeabilidade e a resistência dos moldes cerâmicos devem ser bem controladas quando se usa o processo de vazamento contra gravidade, pois estas influenciam diretamente sobre a capacidade de enchimento dos moldes.

3 - O uso do canal principal para retirar corpos de prova para ensaios de tração não é adequado, pois os resultados obtidos nestes foram muito aquém do esperado, ficando abaixo do valor mínimo estipulado pela norma AMS 4260-C.

4 - A influência da temperatura do molde e da ação da pressão durante a solidificação sobre os resultados obtidos nos ensaios de tração, para ambos os processos de vazamento, ficando claro quando se observam os resultados obtidos com os corpos de prova fei-

tos com a temperatura de vazamento do metal a 700°C.

5 - O processo de vazamento contra gravidade propicia melhores resultados nas propriedades mecânicas para a liga 356 em comparação com o processo convencional. Este acréscimo nas propriedades é comprovado com os resultados dos testes de tração, dureza, densidade e nível de porosidade.

6 - O uso de pressões da ordem de 2kgf/cm², quando se deseja obter um aumento significativo na densidade das peças não se justifica, pois os resultados obtidos com esta pressão são muito próximos aos obtidos quando se usa a pressão de 1kgf/cm² que exige menores cuidados com a segurança do equipamento.

Com base nos resultados obtidos, pode-se dizer ainda que o processo de vazamento contra gravidade aplicado à fundição de precisão pode ser usado para a obtenção de peças com especificações mais rígidas, como as da indústria aeronáutica, quando o processo convencional não é capaz de atingir estes limites.

6 - SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Durante a preparação e execução dos experimentos, surgiram dúvidas e também foram feitas algumas constatações sobre o processo de fundição de precisão.

Baseado nisto e com o intuito de aumentar os conhecimentos sobre o processo e seus métodos de vazamento, são apresentados alguns temas para futuros trabalhos.

- 1 - Permeabilidade das cascas cerâmicas, tendo em vista o número de camadas, densidade da lama, granulometria do estuco, selagem dos cachos e temperatura de pré-aquecimento dos mesmos.
- 2 - Resistência das cascas cerâmicas à verde e após sinterização visando caracterizar a relação número de camadas com resistência.
- 3 - Estudo do acabamento superficial das peças, considerando-se a densidade usada para a lama primária.
- 4 - Estudos para controlar a solidificação do cacho, evitando a solidificação do canal principal no método de vazamento contra gravidade para evitar operações de separação das peças e aumentar a relação material vazado por peça pronta.
- 5 - Combinação dos processos contra gravidade usando simultaneamente vácuo para o enchimento a baixa pressão para a solidificação procurando melhorar ainda mais as propriedades mecânicas das peças.

7 - BIBLIOGRAFIA

- 1 - MINISTERIO de INDUSTRIA e COMERCIO, Conselho de Não-Ferrosos e Siderurgia, Associação Brasileira de Fundição - Fundição de Precisão e Microfusão. Perfil do Setor e Guia de Projeto. 1984.
- 2 - KREKELER, K.A. - Microvisión. Fundición con modelo perdido. Editorial Gustavo Gili S.A.. 1971.
- 3 - MIDGLEY, B. - Guia completa de escultura, modelado y cerámica técnica y materiales. Madrid: Hermann Blume. 1985.
- 4 - BIDWELL, H.T. - Investment casting. The Machinery Publishing Co. Ltd. 1969.
- 5 - PEZZA, C.A. - "O processo de fundição de precisão (Microfusão)". *Jornal Fundição de Precisão* nº 1, Microinox, Caxias do Sul, agosto/setembro.1990.
- 6 - KROHN, B.R. - "The art and science of investment casting". *Modern casting*, dezembro 1984.
- 7 - LOUZEIRO, I.M., MATHES, E. - "Fundição de precisão por cera perdida, contribuição técnica". *Fundição*, nº 168. 1985.
- 8 - SALIN, A.R. - "Fundição de precisão ou microfusão, tecnologia". *Mundo mecânico*, nº 139, março 1988.
- 9 - ALUMINUM CASTING TECHNOLOGY, American Foundrymen's Society, Inc. Des Plaines, Illinois - 1986.
- 10 - SENAI. Fundição de precisão, Centro de Fundição de Itaúna, Minas Gerais, 1981.
- 11 - FUNDIÇÃO DE PRECISÃO, Catálogo Técnico da Fundição de Precisão Rossi. São Leopoldo. s.d.

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

- 12 - MARIOTTO, C.L.; PINTO, E.C.O. - "Fundição de precisão: uma tecnologia sofisticada em desenvolvimento no IPT". **Meta-lurgia** nº 182, ABM. São Paulo: Janeiro 1973.
- 13 - "Conheça a versatilidade da fundição de precisão". **Jornal Fundição de Precisão** nº 2, Microinox. Caxias do Sul - RS Dezembro 1990/Janeiro 1991.
- 14 - SALIN, A. R. - "Fundição de precisão ou microfusão II, tecnologia". **Mundo mecânico** nº 140, São Paulo - Abril 1988.
- 15 - SPRUNK, J.; BLANK, W.; GROSSMANN, W.; HAUSCHILD, E.; RIEKSMEIER, H.; ROSSELNBRUCH, H.G. - "Feinguss für alle industrie bereiche, zweite uberarbeite auflage. Düsseldorf, 1987.
- 16 - HORTON, R.A. - "Investment casting". **Metals handbook**, v. 15. 1988.
- 17 - _____. "Investment casting ASM Committes on production of investment castings." **Metals Handbook**. v. 5
- 18 - RICHARDS, G. - "Fundicion de precision". **Fundicion** nº 235, maio, 1980.
- 19 - ROSENTHAL, H. - "Gating and risering investment casting". **Foundry**, abril, 1961.
- 20 - SHKLENNIK, A.I. - "Design of gating feeding sistem for lost wax casting". **Liteimde proizvodstvo**. 1974.
- 21 - LIESNER, C. "Production properties and applications of titanium investment castings. **Seventeenth B.I.C.T.A. conference**. Setembro, 1983.
- 22 - B.I.C.T.A., Data sheets on Slurry Control. Sheffield. 1974 V.I.
- 23 - LEADBETTER, M.; KNOWLES, G.L.; SAVAGE, P.; BIDWELL, H.T. - Control of primary coating and its relation to surface finish. Ninth annual conference of the of the British investment casters' technical association.

- 24 - BARCELOS, J.L.S. - "Estudo da influência de agentes tensoativos de lama refratária sobre o acabamento superficial de peças microfundidas". P.P.G.E.M.M. (UFRGS). Porto Alegre, setembro, 1990.
- 25 - GOUVEA, J.A., BOLTARINI, C. - "Permeabilidade de moldes cerâmicos tipo casca". Congresso ILAFA/Fundición de fierro y acero. Rio de Janeiro, nov. 1976.
- 26 - CHECKS, D.R. - "Permeability test for ceramic shell-moulds". Foundry Trade Journal. Abril, 1964.
- 27 - SHEPHERD, E.J., LEWIS, N.S. - "Ethyl silicat and coloidal silica as bonding agents for ceramic shell mould". Foundry Trade Journal. Novembro, 1961.
- 28 - ATANMO, P.N. e PIWONKA, T.S. - "Drying of ceramic shell moulds". AFS Cast Metals Research Journal. Set. 1972.
- 29 - SCHWARTZ, C.H. - "Coated stucco solves ceramic shell drying problems". Modern Castings. Junho, 1987.
- 30 - ____ . - "Ceramic shell production developments". Thirty Third Annual Meeting of the Investment Casting Institute. Outubro, 1985.
- 31 - VAN VLACK, L.H. - Princípios de ciência dos materiais. Ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 1970.
- 32 - GOUVEA, J.A. - "Novos processos de vazamento por aspiração". Fundação e Matérias-primas. Nº 46. Setembro, 1982.
- 33 - CHANDLEY, G.D. - "Counter gravity casting of aluminum in investment and sand molds". AFS TRANSACTIONS. s.d.
- 34 - ____ . "Control of fluid flow enhances quality of counter gravity formed castings. Hitchiner's CLA process". 4º World Conference on Investment Castings. Amsterdam, Junho, 1973.
- 35 - YAMADA, K. - "Tecnologia da FBP e ligas de alumínio". Fundação e Matérias-primas. Nº 89, maio, 1988.

- 36 - YAMADA, K. - "Tecnologia da FBP e ligas de alumínio". (2ª parte). **Fundição e Matérias-primas**. Nº 90. São Paulo. Junho, 1988.
- 37 - CHARBONNIER, J. e PERRIER, J.J. - "Inert gas protection of low pressure diecasting injection system". **Glesserei**, nº 2. Janeiro, 1983.
- 38 - MÜLLER, A. - "Estudo da fundição sob pressão do Al e Al 4,5 Cu utilizando o método sifão". **XXXI Congresso Anual da ABM**. Belo Horizonte, julho, 1976.
- 39 - YAMADA, K. - Apostila: Palestra técnica de fundição à baixa pressão, Associação Brasileira do Alumínio, São Paulo. Maio, 1989.
- 40 - NEVES, E.T. - Curso de Hidráulica. Porto Alegre, Globo, 2ª edição. Maio, 1968.
- 41 - GOUVEA, J.A. e Porto, R.M. - "Processo de vazamento de moldes cerâmicos". **Metalurgia. ABM**. Nº 256, v. 35, março, 1979.
- 42 - "Fundição de precisão trabalha com, praticamente, todos os tipos de ligas". **Jornal Fundição de Precisão nº 5**, Microinox. Caxias do Sul, abril/maio, 1991.
- 43 - THORNE, J.K. - "Titanium precision investment casting". **Howmet Turbine Corporation**. Michigan, USA.
- 44 - COUTINHO, T.A. - **Metalografia de não ferrosos. Análise e prática**. Editora Edgard Blücher Ltda. Porto Alegre, 1980.
- 45 - SENAI - **Metalurgia das ligas de alumínio**. Centro de Fundição de Itaúna, Minas Gerais. 1981.
- 46 - GOMES, M.R. e BRESCIANI, E. - "Propriedades e usos de metais não ferrosos". **ABM**. São Paulo, Édile, 1976.
- 47 - FINARDI, J.- "Especificação, propriedades e aplicações das ligas de alumínio para fundição". **ABM**. Curso de Fundição de ligas de metais não ferrosos. São Paulo. 1974.

- 48 - VERRAN, G.O. - "Estudo da alimentação de peças fundidas em ligas de alumínio". PPGEMM, (UFRGS). Porto Alegre, 1986.
- 49 - COUTINHO, T.A. - "Metalografia de não ferrosos". PPGEMM, (UFRGS). Porto Alegre, 1980.
- 50 - BRACALE, G. - "Al-7Si-0,3Mg alloy simple and complex mold casting characteristics". Official Exchange Paper. Itália.
- 51 - HARRIS, R.C.; LIPSON, S.; ROSENTHAL, H. - "Tensile properties of aluminium-silicon-magnesium alloy and the effects of modifications". AFS Transactions, 1956.
- 52 - STONEBROOK, E.E. - "Aluminum and magnesium alloys". Foundry Trade Journal. Setembro, 1959.
- 53 - MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. - Princípios de Metalurgia Mecânica. Editora Edgard Blücher Ltda. 1982.
- 54 - SMALLMAN, R.E. - Modern Physical Metallurgy. 3ª ed., London, Butterworths. 1976.
- 55 - DIETER, G.E. - Metalurgia Mecânica. Rio de Janeiro, Guanabara Kookan S.A. 1981.
- 56 - GUY, A.G. - Elements of Physical Metallurgy. Massachusetts, USA, Addison-Wesley Publishing Co.Inc. 1959.
- 57 - REED-HILL, R.G. - Princípios de Metalurgia Física. Companhia Editorial Continental S.A., México. Abril, 1971.
- 58 - AGUIAR, A.C. - "Estudo de ligas de alumínio obtidas por aspiração". PPGEMM, (UFRGS). Porto Alegre, 1990.

- 8 - A P Ê N D I C E

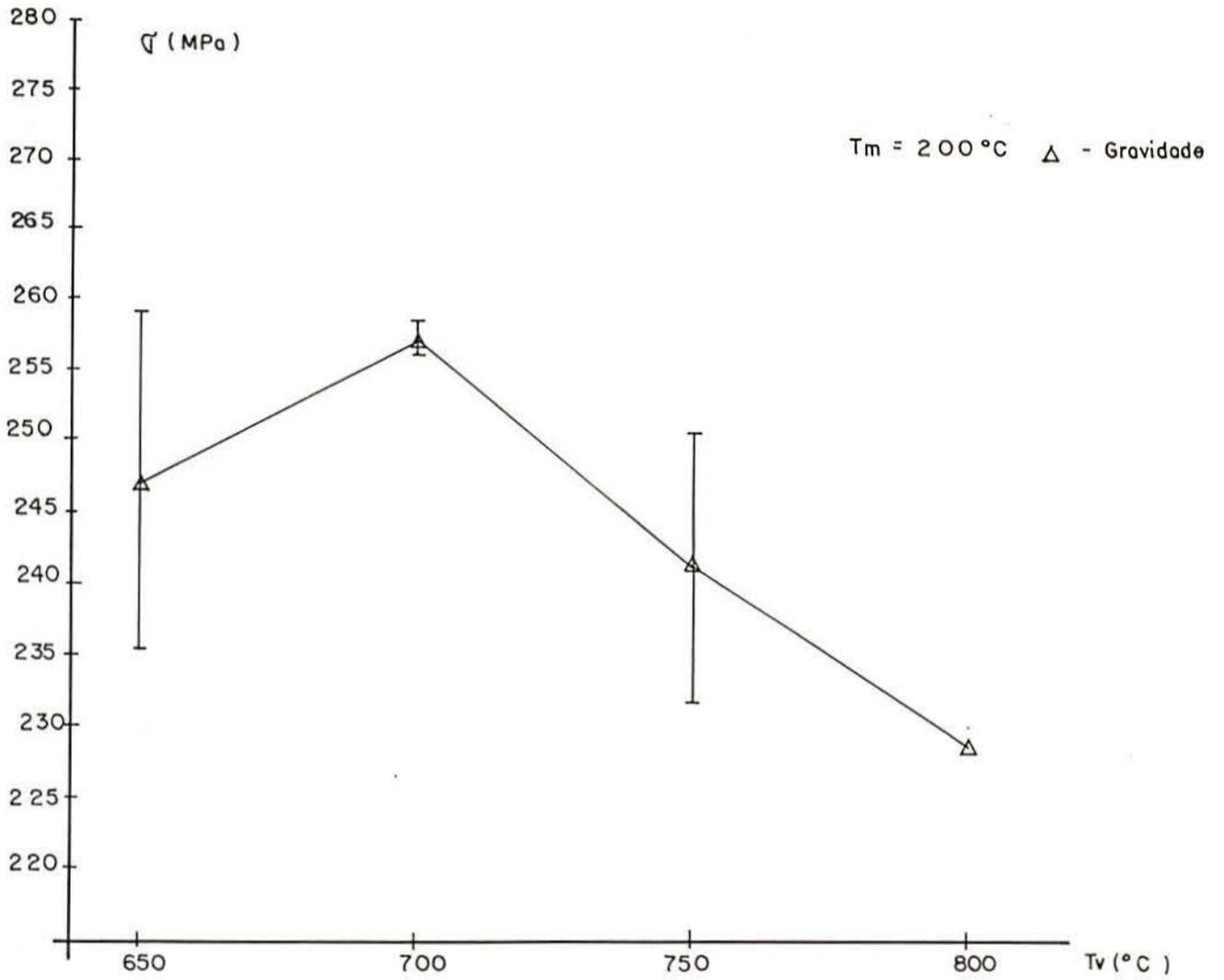


Fig. 47 - Gráfico da tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 200 $^{\circ}\text{C}$, obtidos pelo processo convencional de vazamento

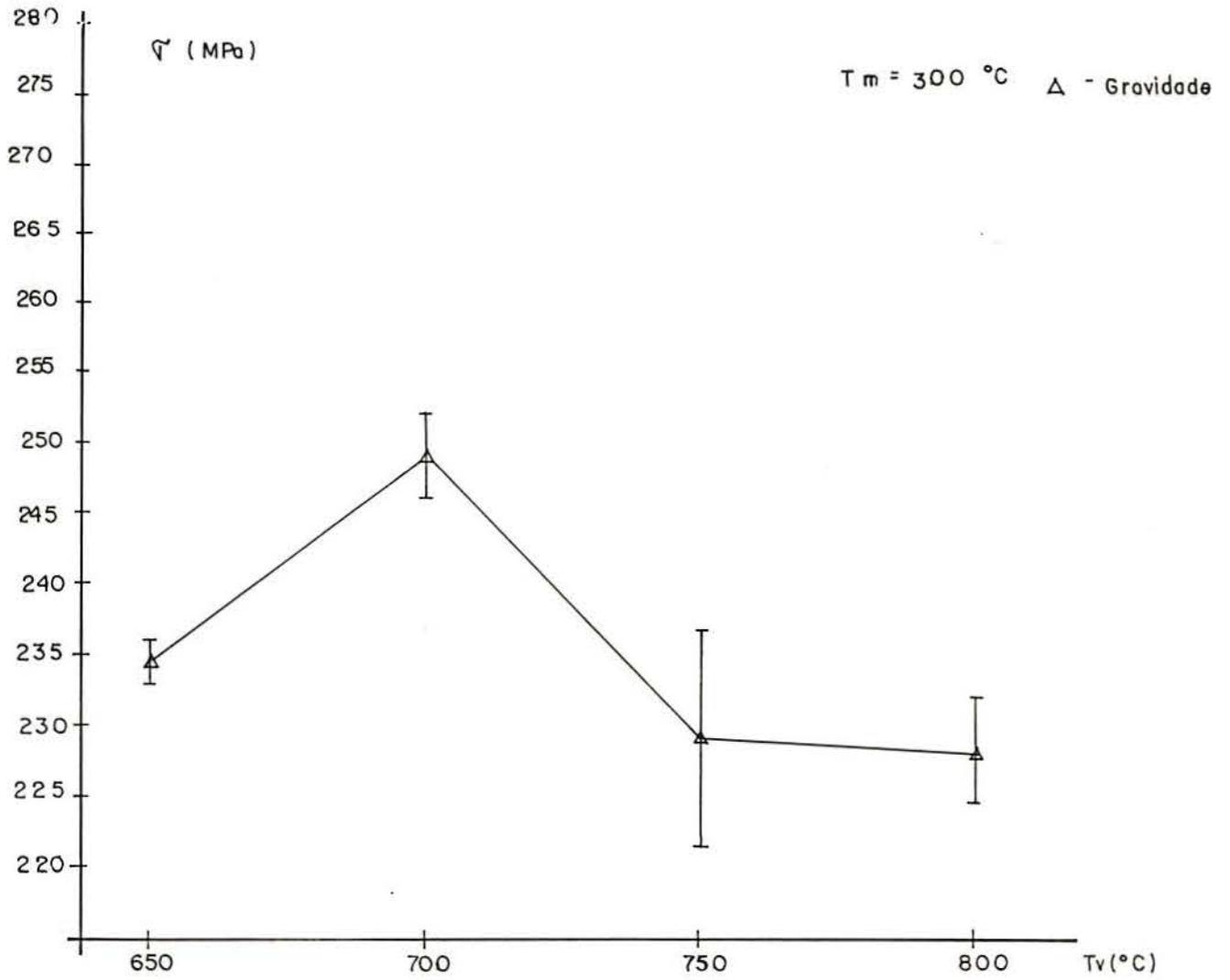


Fig. 48 - Gráfico da tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 300°C obtidos pelo processo convencional de vazamento

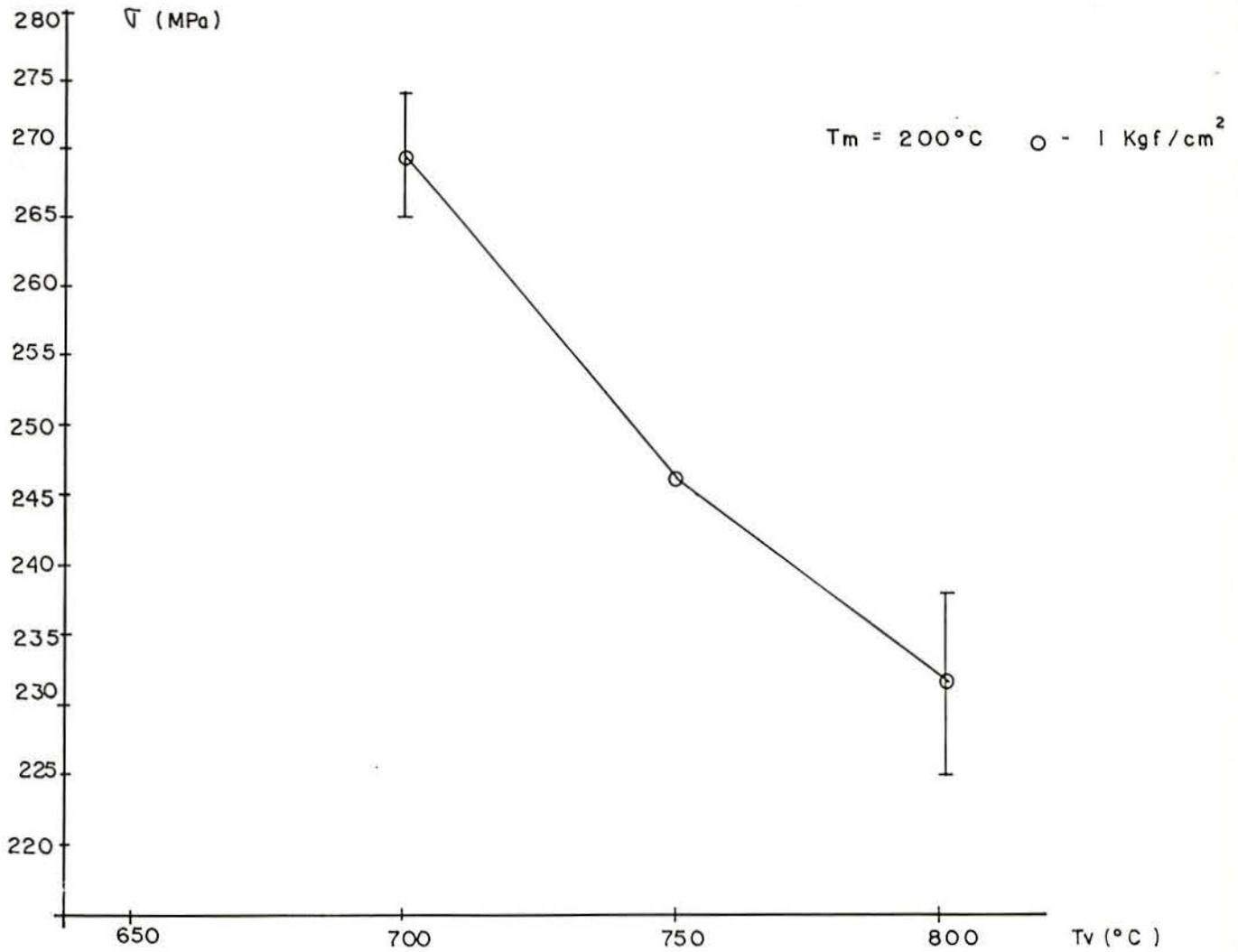


Fig. 49 - Gráfico da tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal para moldes aquecidos a 200°C obtidos pelo processo vazamento contra gravidade usando 1kgf/cm^2 como pressão

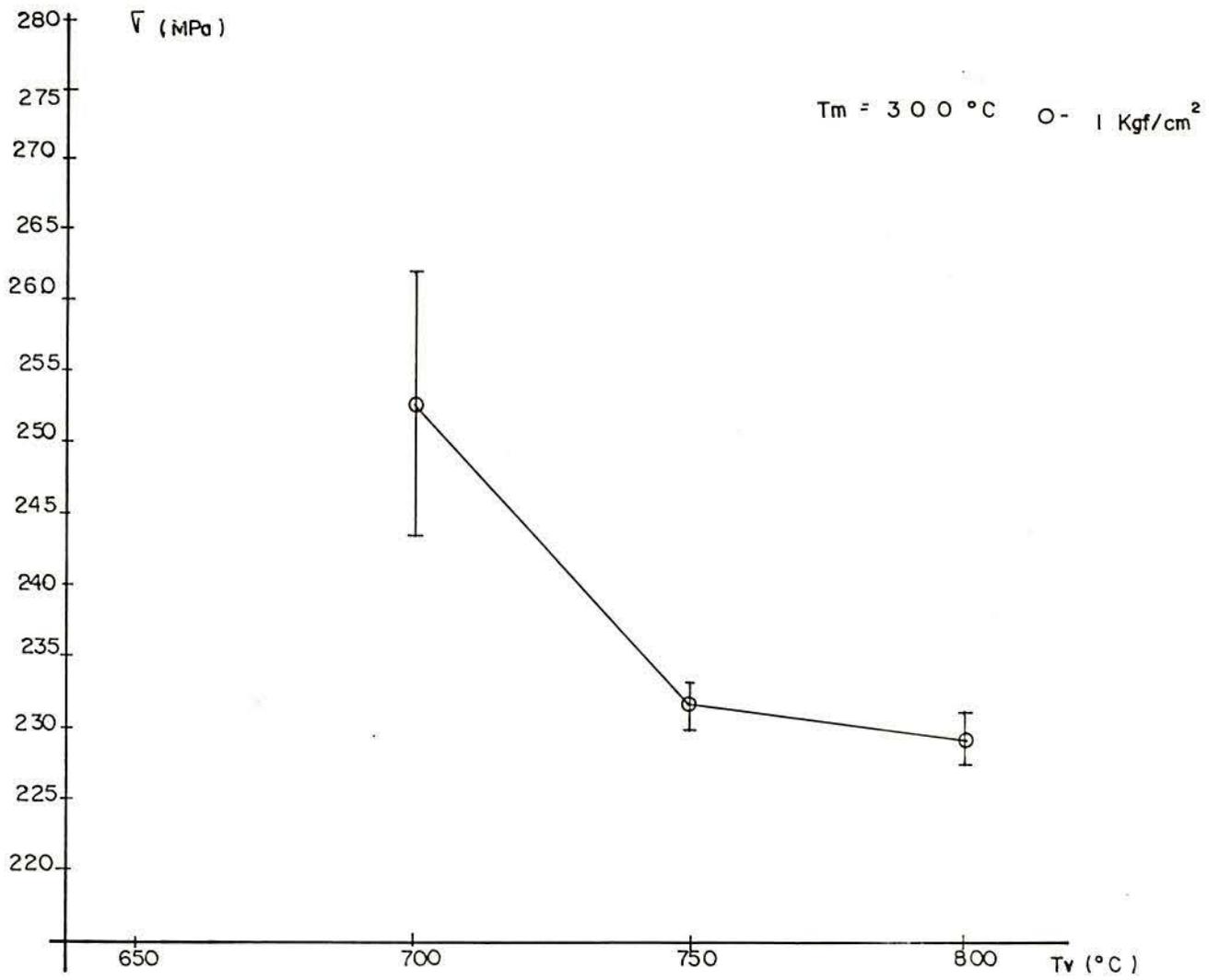


Fig. 50 - Gráfico da tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal para os moldes aquecidos a 300°C obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade usando 1 kgf/cm^2 como pressão

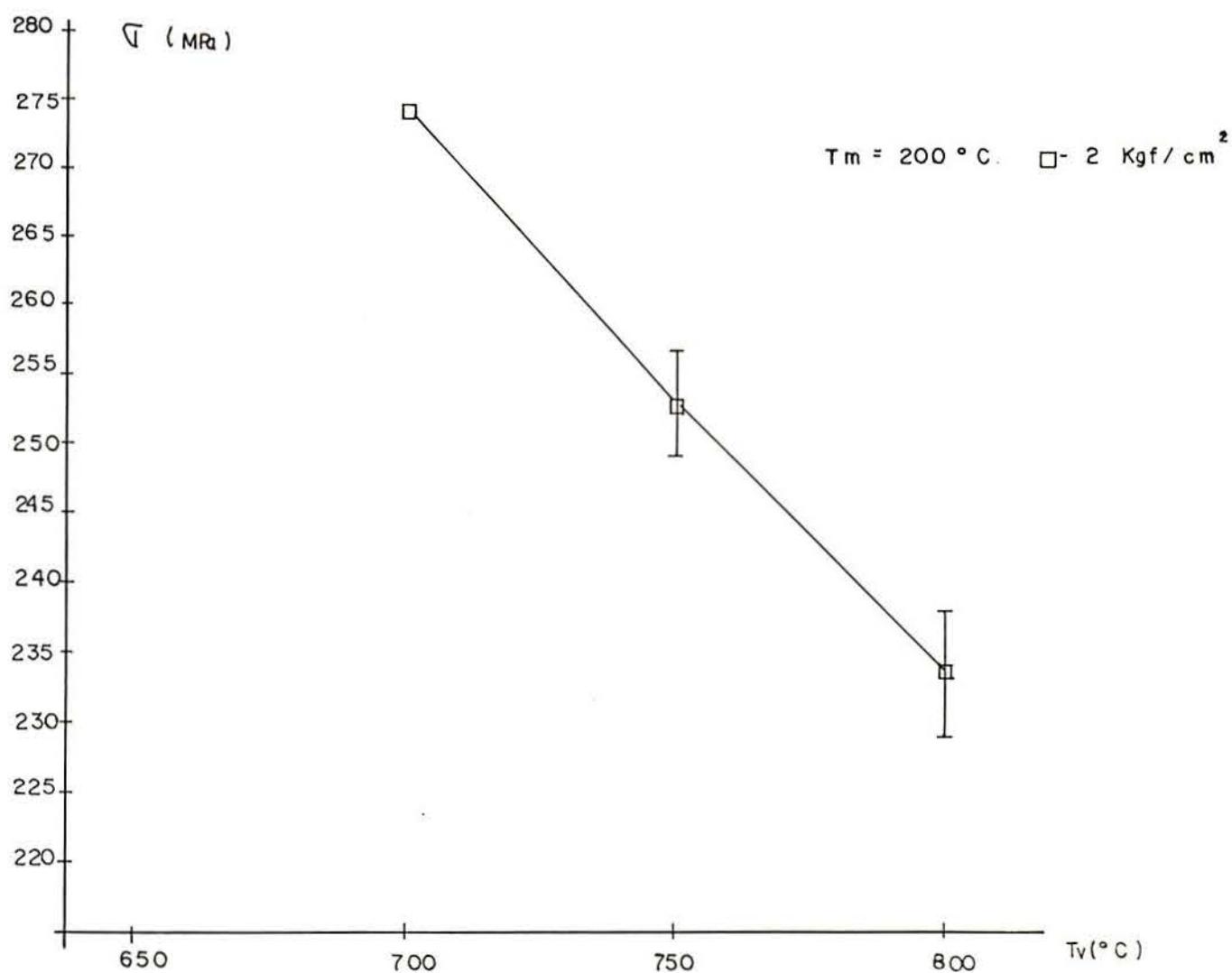


Fig. 51 - Gráfico de tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal para os moldes aquecidos a 200°C , obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade usando 2kgf/cm^2 de pressão

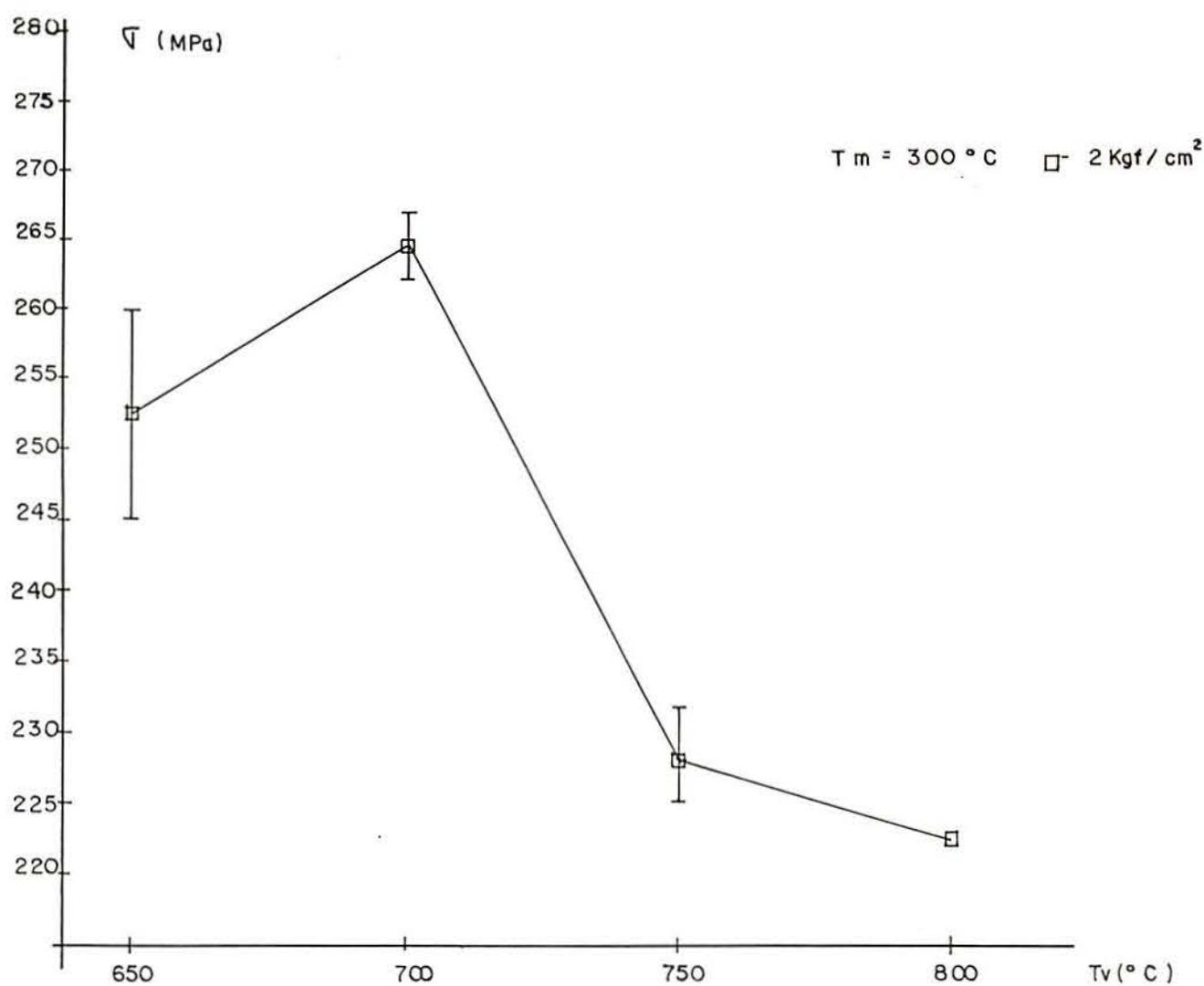


Fig. 52 - Gráfico da tensão de ruptura dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal quando usados moldes aquecidos a 300 $^{\circ}\text{C}$ obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade usando 2 kgf/cm^2 como pressão

PROCESSO / TEMP. MOLDE	F. RUPTURA (Kgf)	φ (mm)	σ (MPa)		F. RUPTURA (Kgf)	φ (mm)	σ (MPa)		F. RUPTURA (Kgf)	φ (mm)	σ (MPa)		F. RUPTURA (Kgf)	φ (mm)	σ (MPa)	
	TEMPERATURA VAZAMENTO 650°C				TEMPERATURA VAZAMENTO 700°C				TEMPERATURA VAZAMENTO 750°C				TEMPERATURA VAZAMENTO 800°C			
GRAVIDADE / 200	1605	9.1	253.1	247.2	1640	9.0	257.8	257.0	1630	9.1	250.6	241.2	1495	9.1	229.8	229.8
GRAVIDADE / 200	1465	8.9	235.4	247.2	1630	9.0	256.2	257.0	1475	9.0	231.8	241.2	1495	9.1	229.8	229.8
GRAVIDADE / 200*	1360	9.1	209.1	/	1240	9.1	190.6	/	1200	9.1	184.5	/	1120	9.1	172.2	/
GRAVIDADE / 300	1470	8.9	236.2	234.6	1640	9.1	252.1	247.0	1540	9.1	236.8	229.1	1510	9.1	232.2	228.3
GRAVIDADE / 300	1450	8.9	233.0	234.6	1600	9.1	246.0	247.0	1440	9.1	221.4	229.1	1460	9.1	224.5	228.3
GRAVIDADE / 300*	1290	9.1	198.3	/	1270	9.1	195.2	/	1120	8.9	180.0	/	1170	9.1	179.1	/
1 Kgf/cm ² / 200					1705	8.9	274.0	269.6	1265	8.9	203.3	245.9	1480	8.9	237.4	231.4
1 Kgf/cm ² / 200					1650	8.9	265.2	269.6	1530	8.9	245.9	245.9	1400	8.9	225.0	231.4
1 Kgf/cm ² / 200*					1120	8.9	180.0	/	1240	9.1	190.6	/	950	8.9	152.7	/
1 Kgf/cm ² / 300					1665	9.0	261.7	252.6	1450	8.9	233.0	231.4	1500	9.1	230.6	229.1
1 Kgf/cm ² / 300					1515	8.9	243.5	252.6	1430	8.9	229.8	231.4	1480	9.1	227.5	229.1
1 Kgf/cm ² / 300*					1100	8.9	176.8	/	1080	8.9	173.6	/	1030	8.9	165.5	/
2 Kgf/cm ² / 200					1710	8.9	274.8	274.0	1595	8.9	256.3	252.7	1480	8.9	237.9	233.4
2 Kgf/cm ² / 200					1700	8.9	273.2	274.0	1550	8.9	249.1	252.7	1425	8.9	229.0	233.4
2 Kgf/cm ² / 200*					1250	8.9	200.9	/	1125	8.9	180.8	/	825	8.9	132.6	/
2 Kgf/cm ² / 300	1690	9.1	259.8	252.4	1660	8.9	266.8	269.4	1440	8.9	231.4	228.7	1420	8.9	228.2	223.4
2 Kgf/cm ² / 300	1525	8.9	245.1	252.4	1630	8.9	262.0	269.4	1400	8.9	225.0	228.7	1360	8.9	218.6	223.4
2 Kgf/cm ² / 300*	1270	8.9	204.1	/	1150	8.9	184.8	/	1155	9.0	181.5	/	1125	8.9	180.8	/

*-Corpo de prova canal principal

TABELA X - TABELA CONTENDO TODOS OS VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO ONDE SÃO APRESENTADOS OS VALORES DA FORÇA DE RUPTURA, O DIÂMETRO DO CORPO DE PROVA E A TENSÃO DA RUPTURA

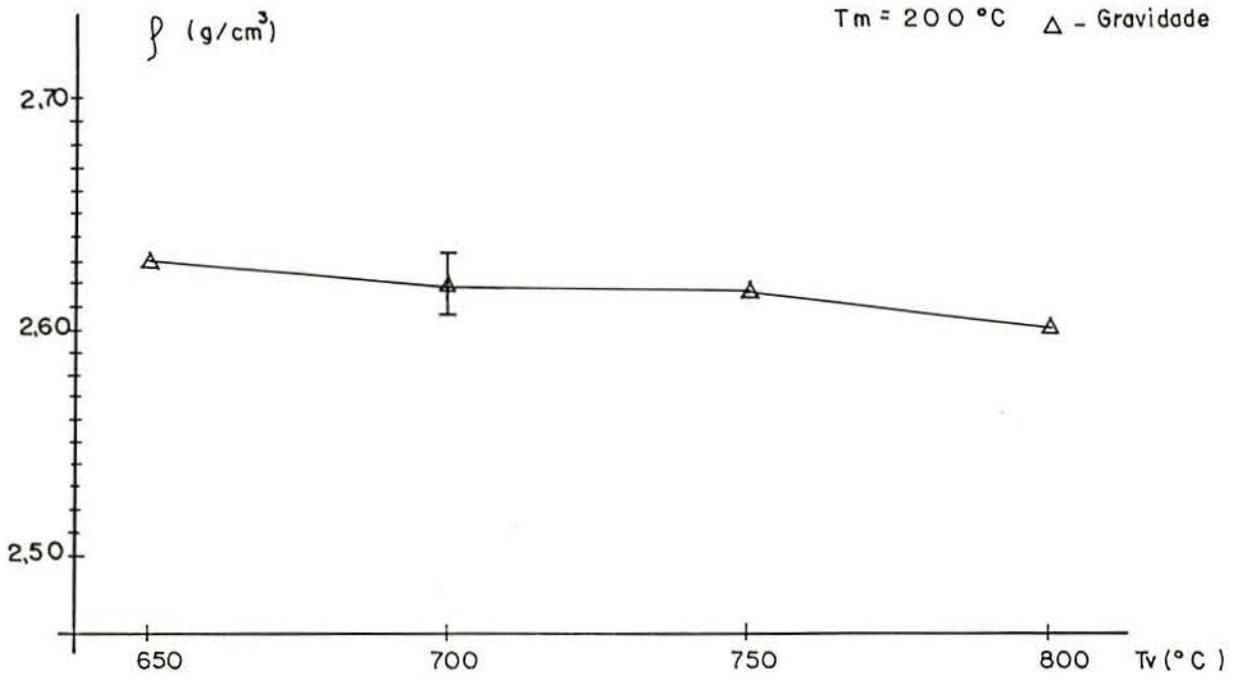


Fig. 53 - Gráfico da densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal quando são usados os moldes aquecidos a 200°C obtidos pelo processo convencional de vazamento

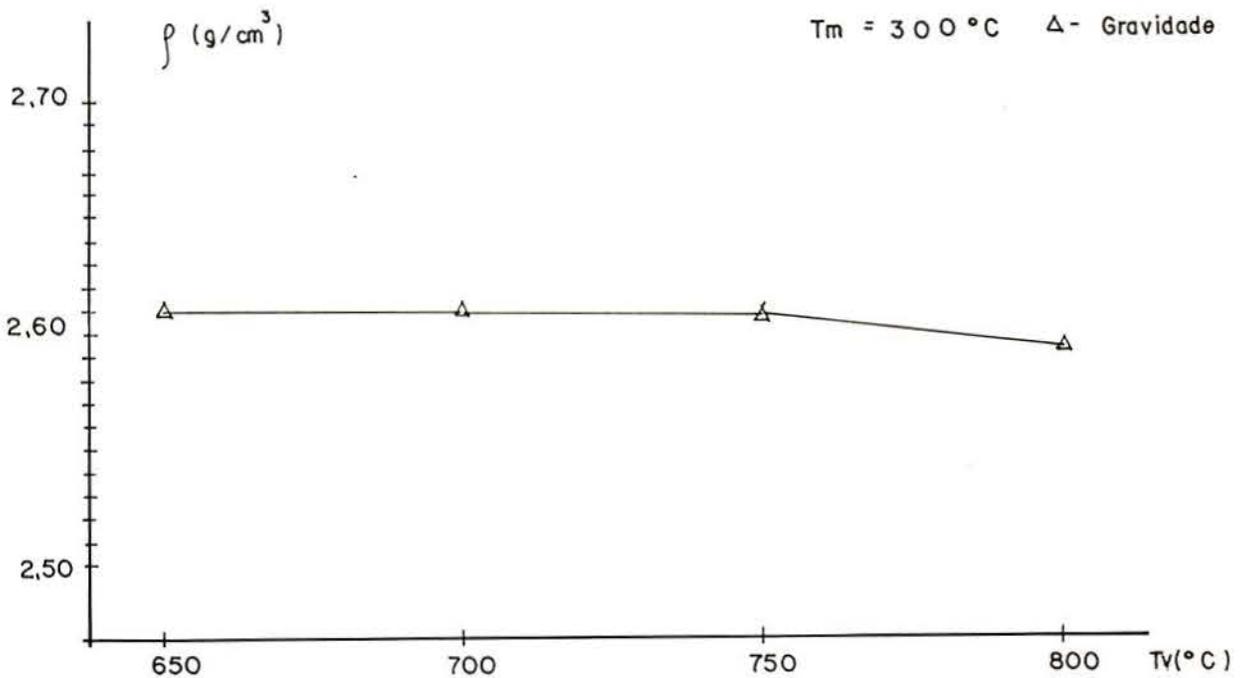


Fig. 54 - Gráfico de densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 300°C , obtidos pelo processo convencional de vazamento

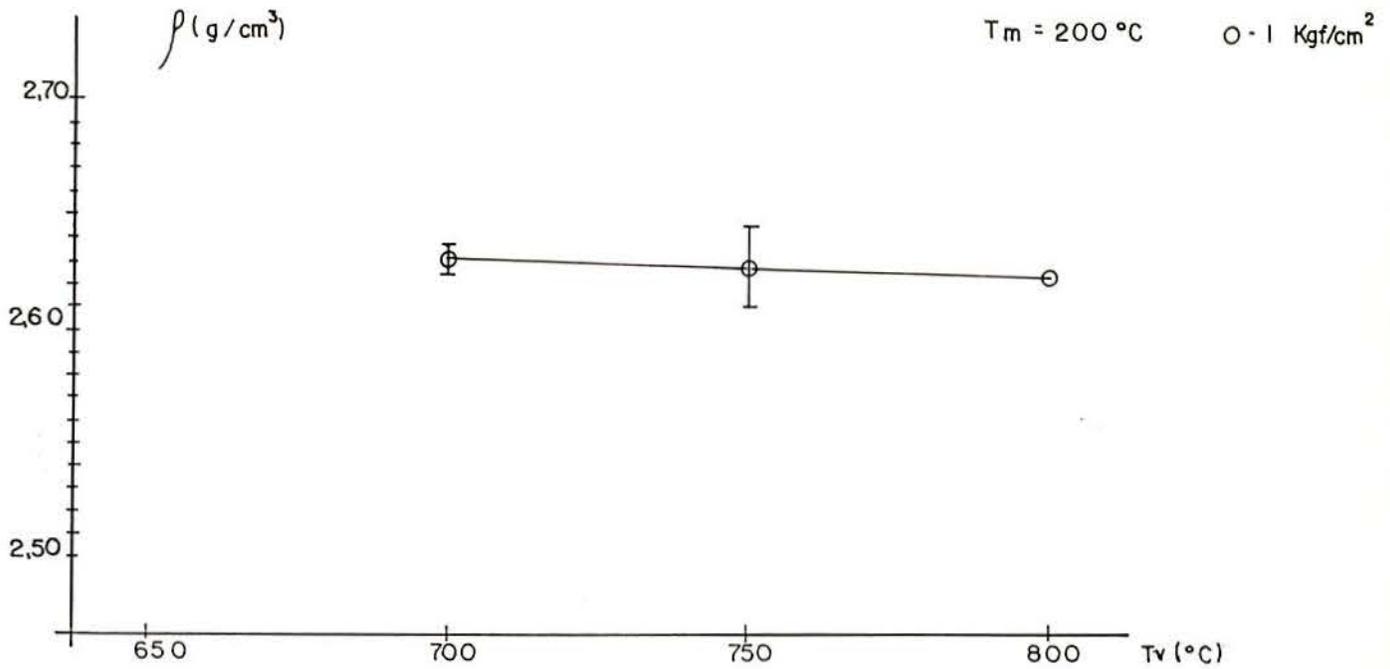


Fig. 55 - Gráfico da densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 200°C, obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade usando 1kgf/cm² como pressão

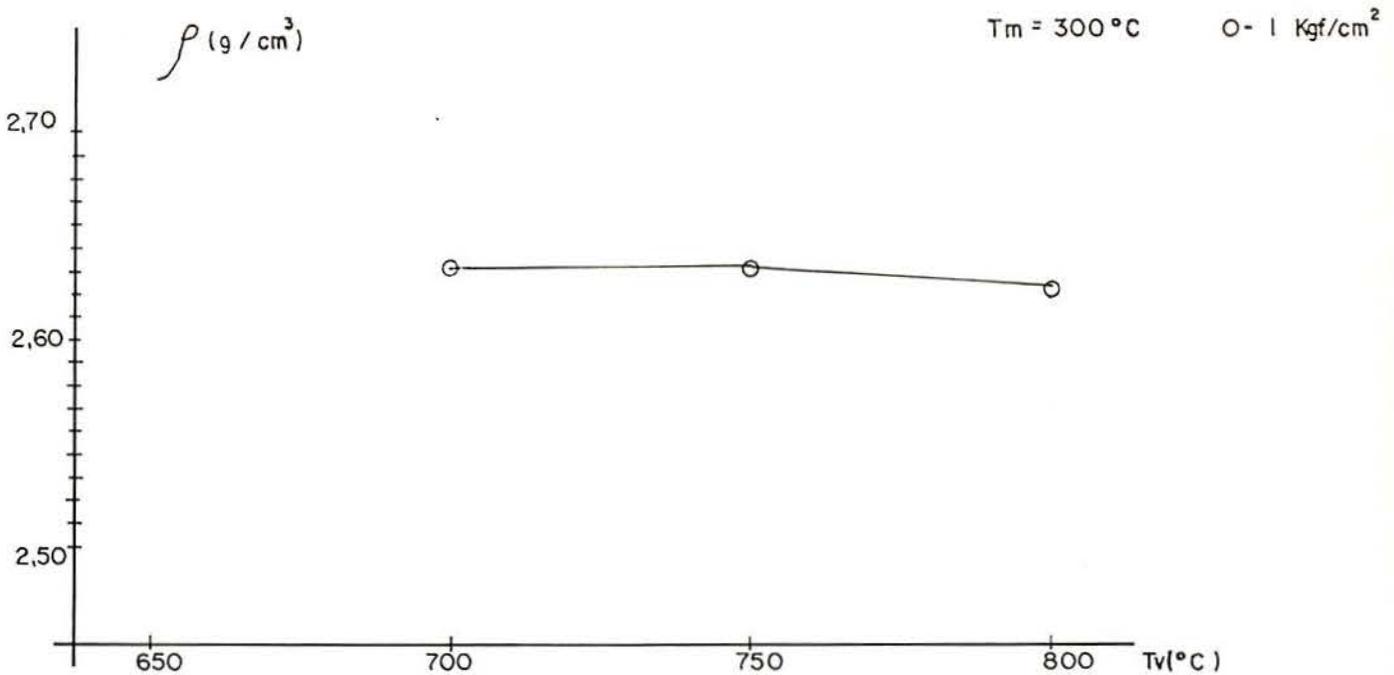


Fig. 56 - Gráfico da densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para moldes aquecidos a 300°C, obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade, usando 1kgf/cm² como pressão

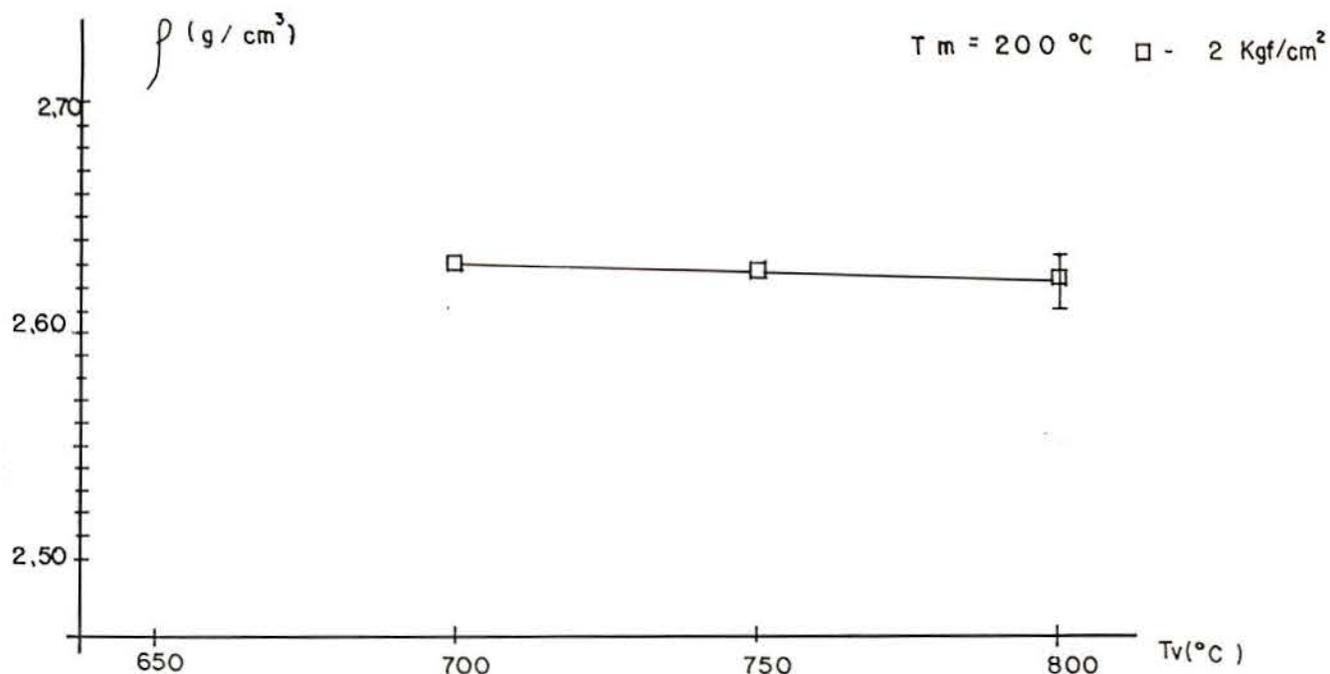


Fig. 57 - Gráfico da densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para os moldes aquecidos a 200°C , obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade, usando 2kgf/cm^2 como pressão

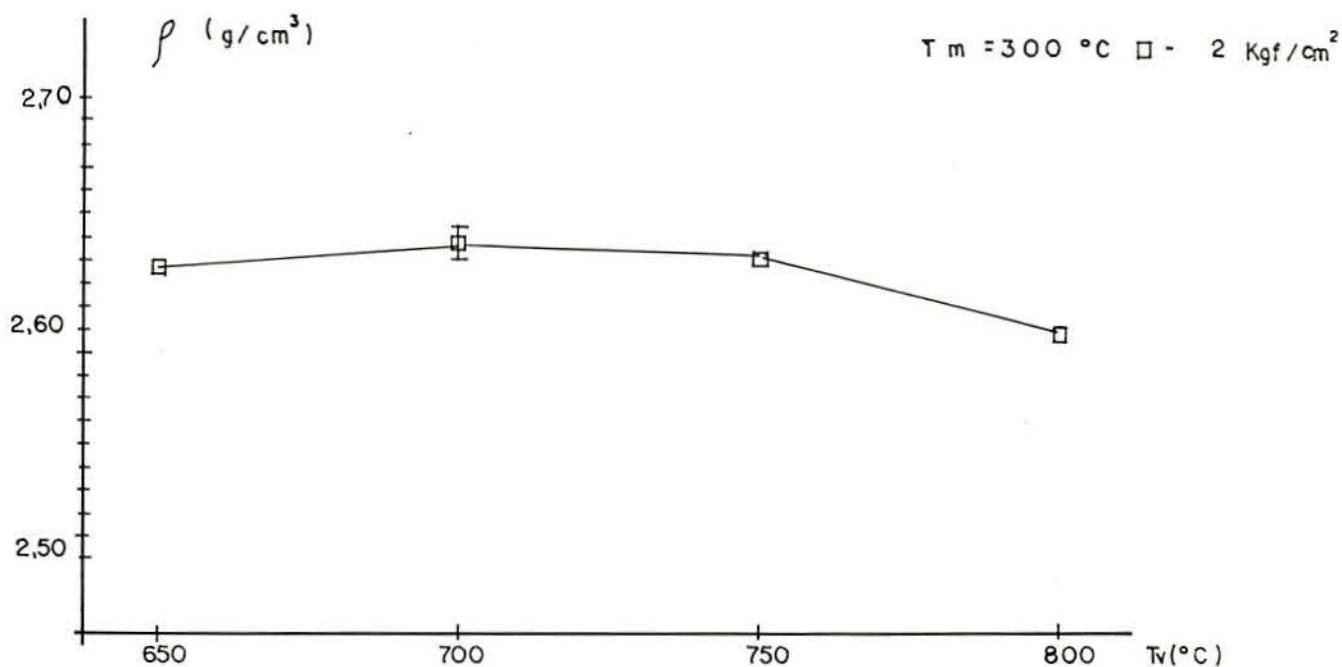


Fig. 58 - Gráfico da densidade dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para os moldes aquecidos a 300°C , obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade, usando 2kgf/cm^2 como pressão

PROCESSO TEMP. MOLDE	φ(mm)	h(mm)	P(g)	ρ(g/cm³)												
	TEMP.	VAZAMENTO 650 °C			TEMP.	VAZAMENTO 700 °C			TEMP.	VAZAMENTO 750 °C			TEMP.	VAZAMENTO 800 °C		
GRAVIDADE/200	12.03	11.42	3.41	2.627	12.03	11.78	3.49	2.606	12.03	11.59	3.44	2.611	12.03	11.82	3.50	2.605
GRAVIDADE/200	12.01	11.66	3.48	2.634	12.02	11.78	3.52	2.633	12.03	11.53	3.43	2.617	12.03	11.74	3.47	2.600
GRAVIDADE/300	12.04	11.99	3.57	2.615	12.05	11.90	3.55	2.615	12.04	11.67	3.47	2.602	12.06	11.64	3.45	2.594
GRAVIDADE/300	12.03	12.00	3.56	2.610	12.06	11.77	3.50	2.603	12.05	11.05	3.53	2.612	12.03	12.12	3.57	2.591
1 kgf/cm²/200					12.02	11.73	3.51	2.637	12.02	11.86	3.56	2.645	12.02	11.79	3.51	2.621
1 kgf/cm²/200					12.02	11.80	3.54	2.625	12.02	11.47	3.41	2.611	12.02	11.95	3.55	2.625
1 kgf/cm²/300					12.03	11.80	3.55	2.629	12.02	11.73	3.50	2.629	12.03	11.25	3.35	2.619
1 kgf/cm²/300					12.02	11.81	3.53	2.634	12.02	11.01	3.53	2.634	12.03	11.93	3.58	2.626
2 kgf/cm²/200					12.03	11.81	3.53	2.629	12.02	11.80	3.52	2.620	12.02	11.78	3.49	2.610
2 kgf/cm²/200					12.02	11.84	3.54	2.634	12.03	11.73	3.50	2.625	12.02	11.75	3.51	2.632
2 kgf/cm²/300	12.03	11.56	3.45	2.625	12.02	11.75	3.52	2.640	12.02	11.82	3.53	2.631	12.02	11.96	3.52	2.593
2 kgf/cm²/300	12.03	11.88	3.55	2.629	12.03	11.94	3.57	2.630	12.02	11.39	3.40	2.630	12.02	11.61	3.43	2.603
GRAVIDADE/200*	12.05	11.84	3.53	2.614	12.05	11.76	3.49	2.602	12.06	11.67	3.47	2.603	12.06	11.64	3.44	2.587
GRAVIDADE/300*	12.06	11.39	3.38	2.597	12.06	11.77	3.49	2.595	12.02	11.58	3.42	2.602	12.06	11.98	3.55	2.594
1 kgf/cm²/200*					12.04	11.07	3.54	2.619	12.02	11.20	3.27	2.572	12.04	11.78	3.39	2.527
1 kgf/cm²/300*					12.05	11.29	3.37	2.617	12.05	11.76	3.51	2.617	12.05	12.07	3.56	2.586
2 kgf/cm²/200*					12.04	11.79	3.51	2.614	12.04	11.62	3.45	2.607	12.05	11.54	3.34	2.537
2 kgf/cm²/300*	12.02	11.01	3.50	2.611	12.04	11.81	3.55	2.622	12.02	11.51	3.33	2.549	12.05	11.60	3.09	2.335

*-Corpos de prova do canal principal

TABELA XI - TABELA COM OS VALORES OBTIDOS NOS TESTES PARA AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DOS CORPOS DE PROVA

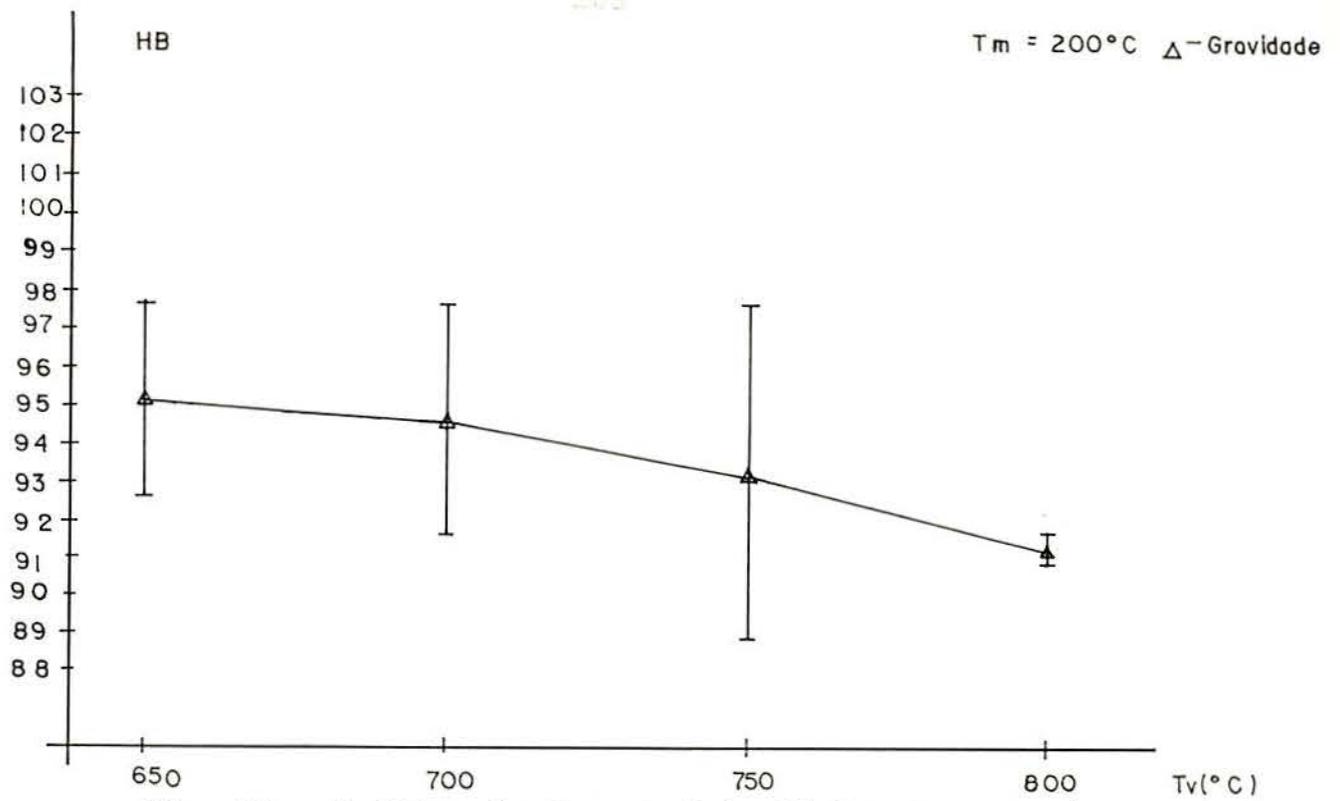


Fig. 59 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para os moldes aquecidos a 200°C, obtidos pelo processo convencional de vazamento

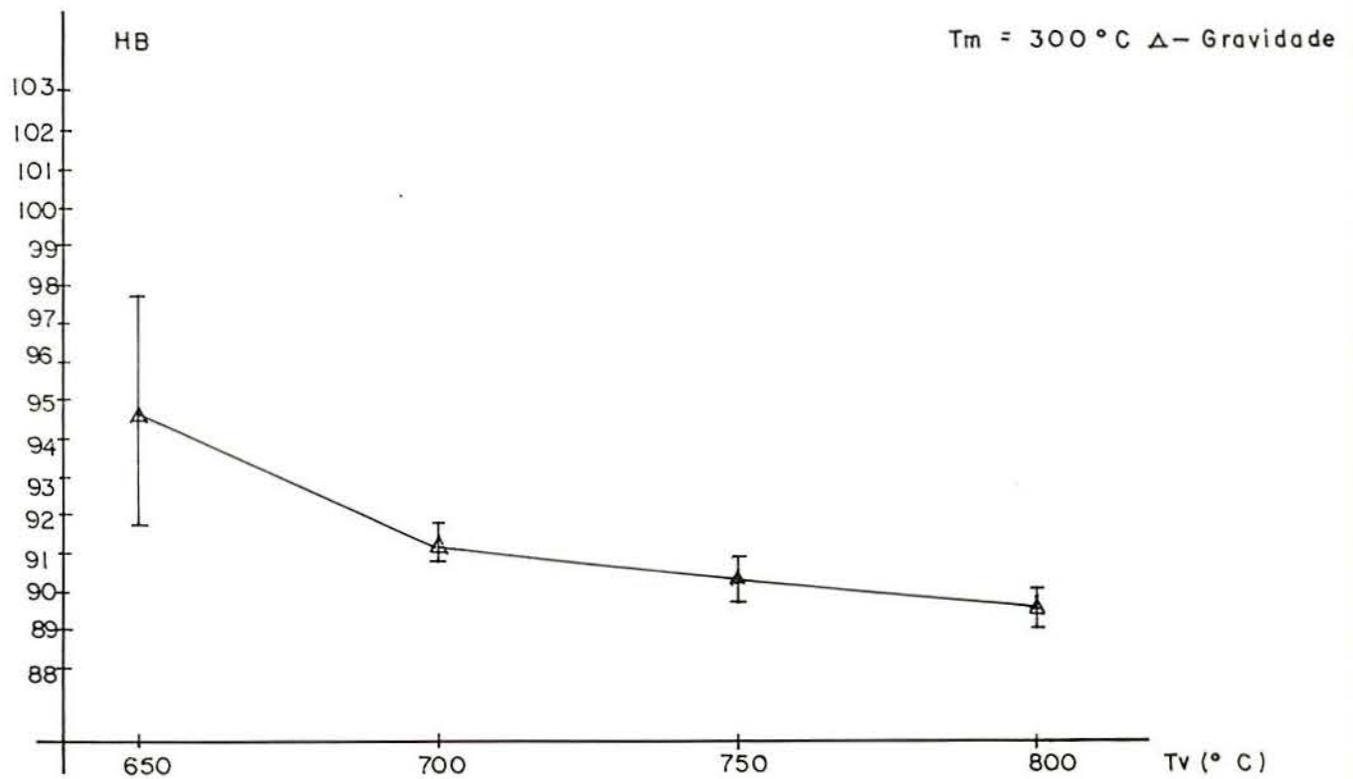


Fig. 60 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal, para os moldes aquecidos a 300°C, obtidos pelo processo convencional de vazamento

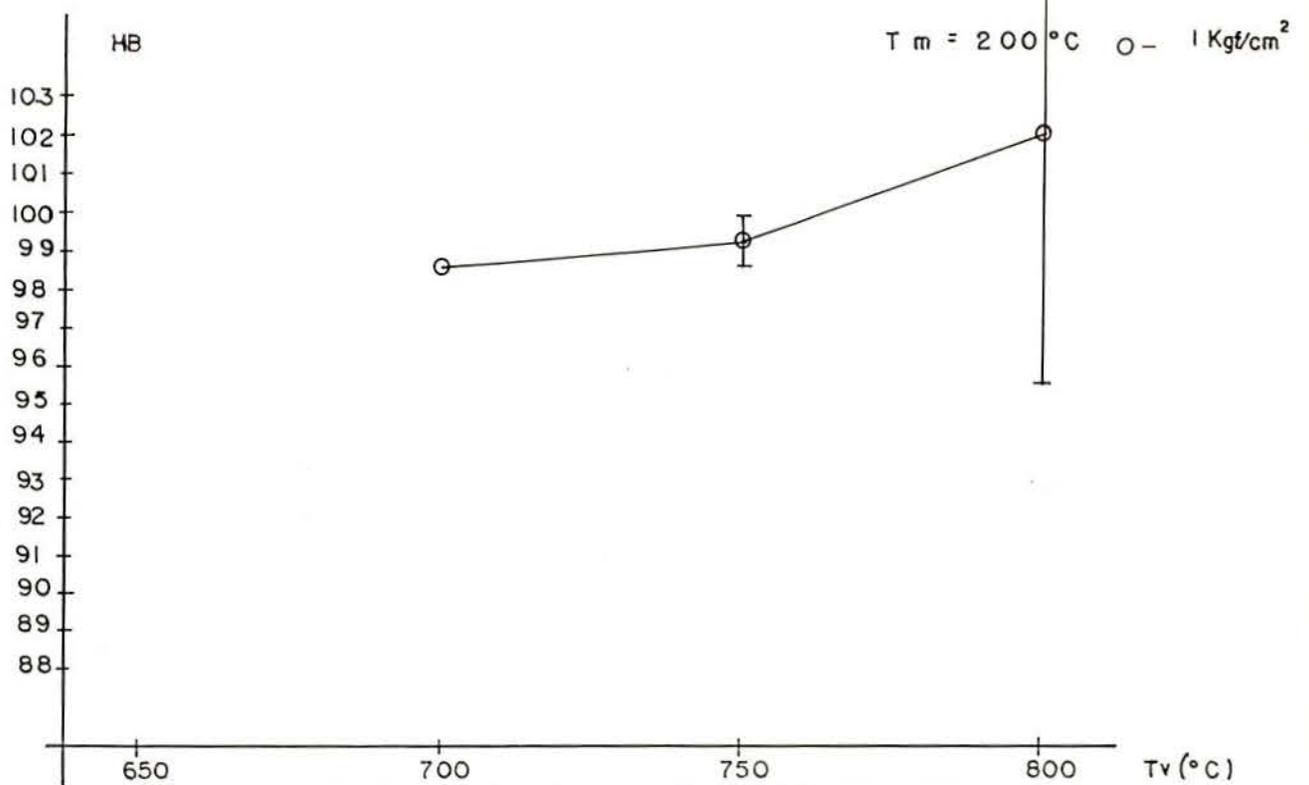


Fig. 61 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal para os moldes aquecidos a 200°C, obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade, usando 1kgf/cm² como pressão

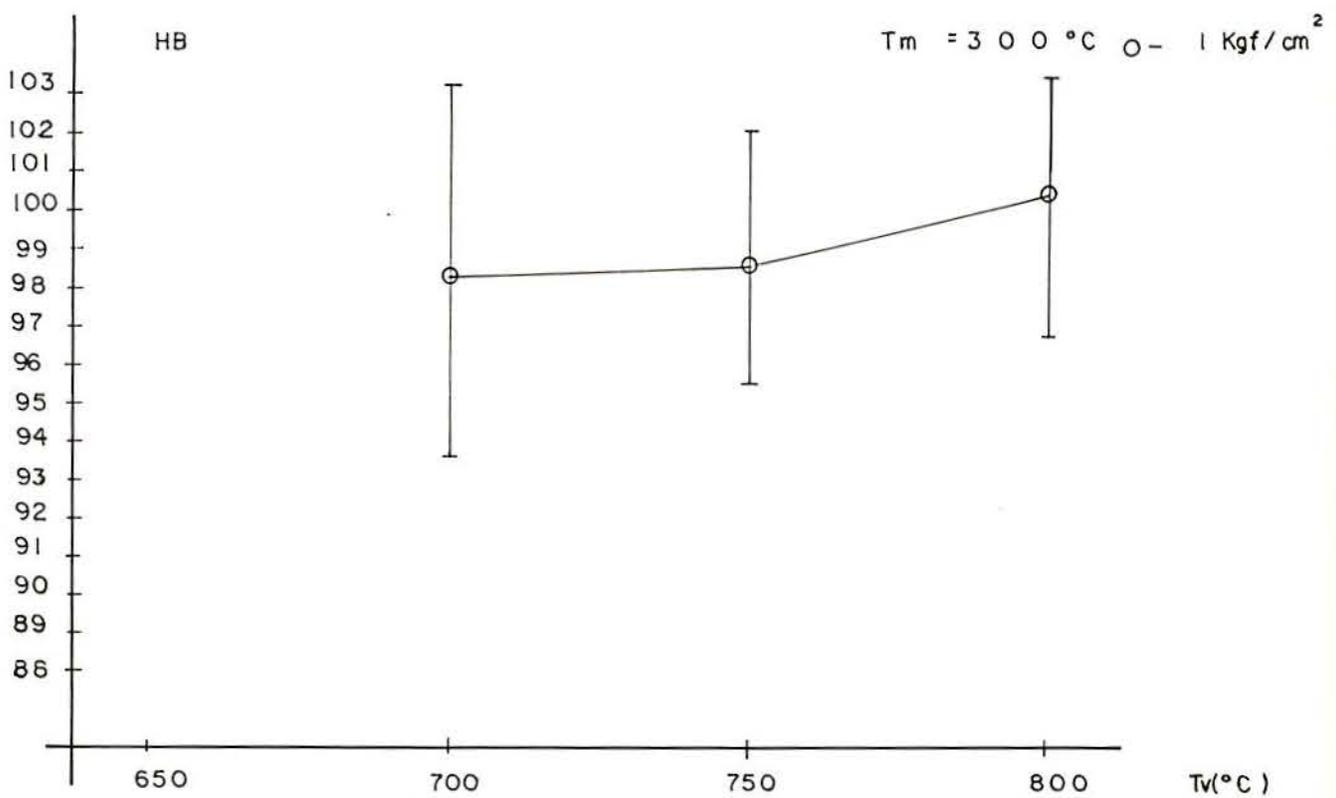


Fig. 62 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal para os moldes aquecidos a 300°C, obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade, usando 1kgf/cm² como pressão

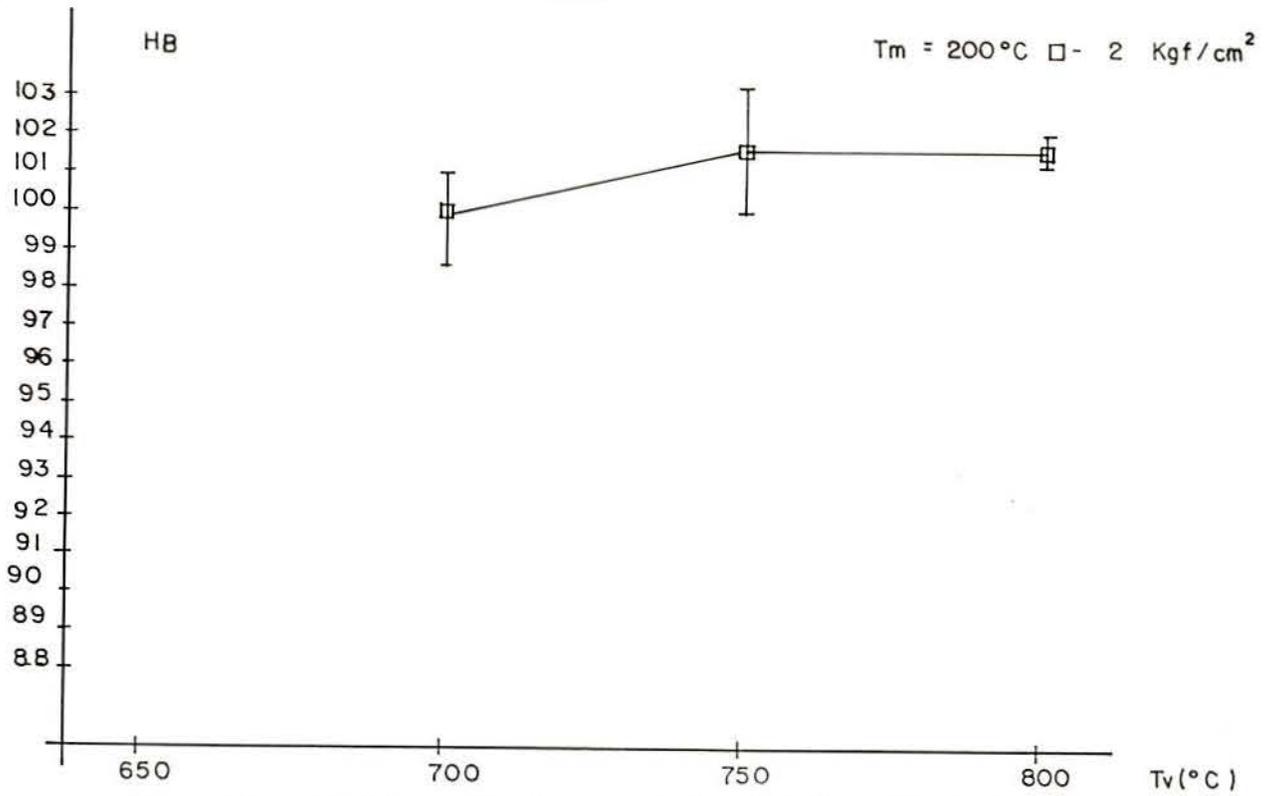


Fig. 63 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal para os moldes aquecidos a 200°C , obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade, usando 2kgf/cm^2 como pressão

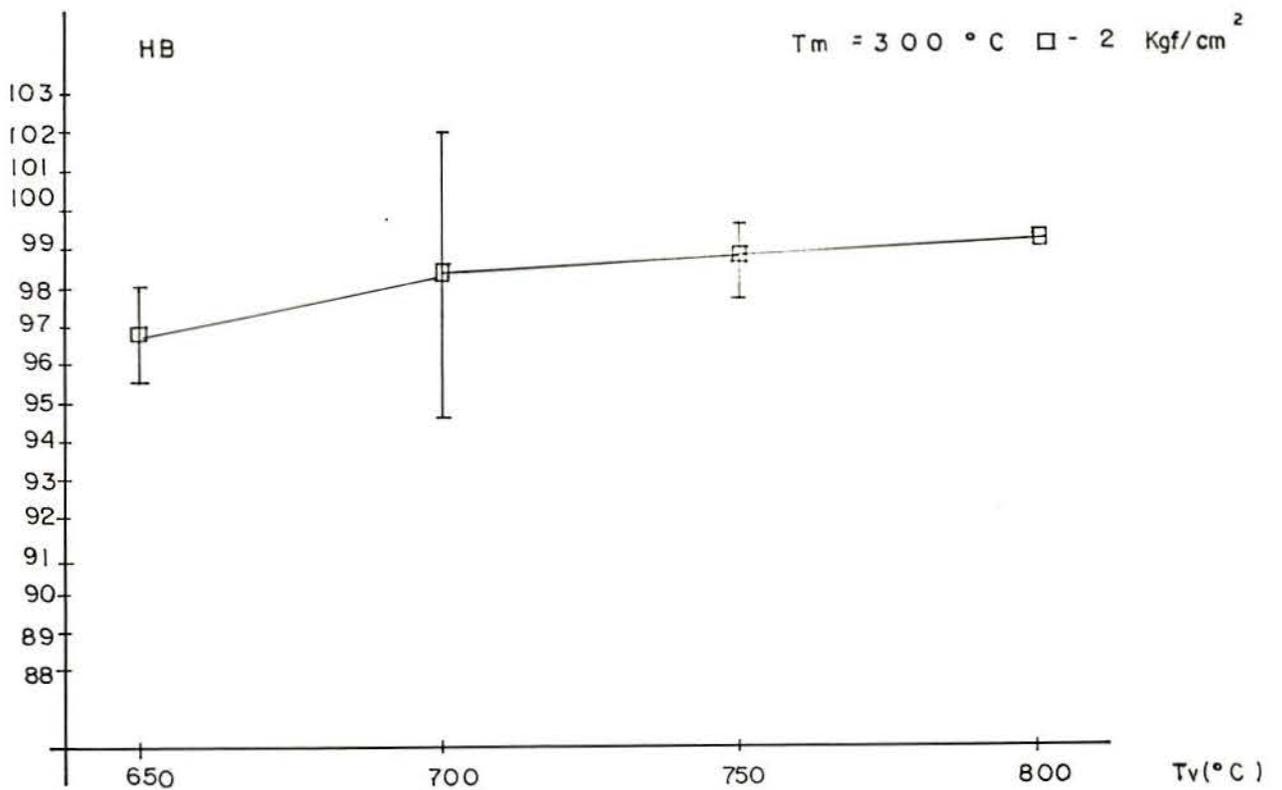


Fig. 64 - Gráfico da dureza Brinell dos corpos de prova em função da temperatura de vazamento do metal para os moldes aquecidos a 300°C , obtidos pelo processo de vazamento contra gravidade, usando 2kgf/cm^2 como pressão

PROCESSO / TEMP. MOLDE	φ (mm)		HB		φ (mm)		HB		φ (mm)		HB		φ (mm)		HB	
	TEMPERATURA VAZAMID 650°C				TEMPERATURA VAZAMID 700°C				TEMPERATURA VAZAMID 750°C				TEMPERATURA VAZAMID 800°C			
GRAVIDADE / 200	0.650	0.641	92.6	95.21	0.653	0.643	91.73	94.63	0.633	0.648	97.67	93.18	0.653	0.655	91.73	91.15
GRAVIDADE / 200	0.633	0.641	97.67	95.21	0.633	0.643	97.67	94.63	0.663	0.648	88.89	93.18	0.656	0.655	90.86	91.15
GRAVIDADE / 300	0.633	0.643	97.67	94.63	0.653	0.655	91.73	91.15	0.656	0.658	90.86	99.28	0.659	0.661	89.98	89.93
GRAVIDADE / 300	0.653	0.643	91.73	94.63	0.656	0.655	90.86	91.15	0.660	0.658	88.70	99.28	0.663	0.661	88.89	89.93
1kgf/cm ² / 200					0.630	0.630	98.60	98.60	0.626	0.628	99.96	99.28	0.640	0.620	95.50	102.00
1kgf/cm ² / 200					0.630	0.630	98.60	98.60	0.630	0.628	99.60	99.28	0.600	0.620	109.00	102.00
1kgf/cm ² / 300					0.616	0.631	103.20	98.29	0.640	0.630	95.50	98.60	0.614	0.625	103.80	100.30
1kgf/cm ² / 300					0.646	0.631	93.76	98.29	0.620	0.630	102.00	98.60	0.636	0.625	96.74	100.30
2kgf/cm ² / 200					0.630	0.626	98.60	99.96	0.616	0.621	103.20	101.66	0.620	0.621	102.00	101.66
2kgf/cm ² / 200					0.623	0.626	100.98	99.96	0.626	0.621	99.96	101.66	0.622	0.621	101.32	101.66
2kgf/cm ² / 300	0.632	0.636	97.98	96.74	0.643	0.621	94.63	98.29	0.627	0.630	99.62	98.60	0.620	0.628	98.60	99.28
2kgf/cm ² / 300	0.640	0.636	95.50	96.74	0.620	0.621	102.00	98.29	0.633	0.630	97.67	98.60	0.626	0.628	99.96	99.28

TABELA XII - TABELA CONTENDO TODOS OS VALORES OBTIDOS NOS ENSAIOS DE DUREZA BRINELL REALIZADOS NOS CORPOS DE PROVA