

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

professor Arso Muller pela orientação transmitida para a realização

Forjasil Materiais Plásticos, através do Diretor Industrial Paulo Djalma
Mendonça Gilberto Eugênio Maudrot, pela possibilidade de realiza-
do, bem como por todo apoio na realização do mesmo.

toda equipe de produção da Forjasil, em especial a Lairo Bert e M
e Campos.

os colegas da UFRGS, em especial à Marco Antônio Machado, Fred
Junior e Rodrigo Villanova, pelo companheirismo e amizade.

**DESGASEIFICAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO:
COMPARAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS -
DESGASEIFICAÇÃO ROTATIVA E DESGASEIFICAÇÃO COM
PLUG POROSO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO

Autor: André Cousandier Galant

Porto Alegre, junho de 1995.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Arno Muller pela orientação transmitida para a realização deste trabalho.

À Forjasul Materiais Elétricos, através do Diretor Industrial Paulo Dhamer e do Eng. Metalúrgico Gilberto Eugênio Manfroi, pela possibilidade de realização deste estudo, bem como por todo apoio na realização do mesmo.

À toda equipe de produção da Forjasul, em especial a Lauri Berté e Vismar Ramos de Campos.

Aos colegas da UFRGS, em especial à Marco Antônio Machado, Frederico Machado Júnior e Rodrigo Villanova, pelo companheirismo e amizade.

1 - Introdução	1
2 - Parte experimental	15
2.1 - Matéria-prima	15
2.2 - Equipamentos	16
2.3 - Metodologia experimental	16
2.3.1 - Testes relativos à utilização de Class Tech II	19
2.3.1.1 - Repetibilidade do método de controle	22
2.3.1.2 - Efeito da forma de colares	23
2.3.2 - Tensões e absorção de hidrogênio em	24
2.3.2.1 - Tensões relativas à desgasificação	25
2.3.2.2 - Absorção de hidrogênio posteriormente à	27
2.3.2.3 - Tratamento de desgasificação	27
3 - Resultados	31
4 - Discussão dos resultados	62
5 - Conclusões	66
6 - Bibliografia	67

ÍNDICE

1 - Introdução	1
2 - Objetivo	2
3 - Revisão Bibliográfica	3
3.1 - Hidrogênio	3
3.1.2 - Fontes de hidrogênio	5
3.1.3 - Efeitos do hidrogênio	6
3.2 - Método de controle : Teste Straube-Pfeiffer	9
3.3 - Desgaseificação	14
3.3.1 - Princípios da remoção do hidrogênio	14
3.3.2 - Métodos de desgaseificação	17
3.3.2.1 - Gás de limpeza	17
3.3.2.2 - Desgaseificação co hexacloretano	19
3.3.2.3 - Desgaseificação rotativa	19
3.3.2.4 - Outros sistemas mecânicos	22
3.3.2.5 - Plug poroso para desgaseificação	23
4 - Parte experimental	25
4.1 - Matérias-primas	25
4.2 - Equipamentos	25
4.3 - Metodologia experimental	31
4.3.1 - Testes relativos à utilização do Gas-Tech II	32
4.3.1.1 - Repetibilidade do método de controle	33
4.3.1.2 - Efeito da forma de coleta	33
4.3.2 - Tendência à absorção de hidrogênio em função da temperatura do banho	33
4.3.3 - Tendência à absorção de hidrogênio em função da umidade relativa do ar	34
4.3.4 - Testes relativos à desgaseificação	35
4.3.5 - Absorção de hidrogênio posteriormente ao tratamento de desgaseificação	37
5 - Resultados	
6 - Discussão dos resultados	63
7 - Conclusões	66
8 - Bibliografia	67

1 - INTRODUÇÃO

Sem sombra de dúvida, um dos principais problemas relacionados com a qualidade de peças fundidas em ligas de alumínio é a presença de hidrogênio dissolvido no banho metálico anteriormente ao vazamento.

Este gás, único que possui solubilidade no alumínio, é, na sua maior parte, expulso da solução no momento da solidificação, sendo responsável direto pela formação de macro e microporosidades nas regiões críticas das peças. Esses defeitos atingem diretamente as propriedades mecânicas dos componentes, além de prejudicarem totalmente a apresentação das peças, nos casos em que surgem na superfície.

Apesar de existirem boas técnicas de fundição desenvolvidas para minimizar a absorção do hidrogênio desde a etapa da fusão do alumínio, na maioria dos casos são necessários tratamentos de desgaseificação, os quais reduzem consideravelmente o seu nível e permitem que seja obtida uma melhor qualidade de fundidos.

Estes tratamentos podem ser realizados de diversas formas, sendo que o princípio da remoção é o mesmo na maioria delas, embora as características funcionais e operacionais variem consideravelmente conforme o método utilizado, resultando em resultados práticos diferentes.

2 - OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar comparativamente dois dos principais métodos de degaseificação disponíveis no mercado - degaseificação rotativa e plug poroso - estabelecendo uma relação entre eficiência e viabilidade para ambos.

Para melhor compreensão dos fenômenos envolvidos e diagnóstico de possíveis distorções nos resultados, serão também avaliados os principais aspectos que exercem influência na problemática da absorção e comportamento do hidrogênio em ligas de alumínio.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Todos os gases reativos, com exceção do hidrogênio, formam compostos com o alumínio, os quais são insolúveis à temperatura de fusão. Estas impurezas (óxidos) em parte sobrenadam no metal (escórias) e em parte ficam em suspensão no banho, tendendo a dar segregações nas peças afetando as propriedades, como é o caso do óxido de alumínio (Al_2O_3), que dificilmente decanta e diminui a fluidez do metal.

São também estes óxidos prejudiciais a vida do ferramental, dos cadinhos e fornos, em função do seu caráter abrasivo.

Em se tratando de injeção de alumínio puro, para fins elétricos, as impurezas influem diretamente na condutibilidade elétrica. Quanto maior o percentual de impurezas menor será a condutibilidade e menor será a eficiência das peças resultantes.

3.1 - Hidrogênio

De todos os possíveis gases, muitas investigações mostraram que apenas o hidrogênio é solúvel em alguma extensão no alumínio puro ou em ligas de alumínio. Na verdade, o alumínio dissolve menos hidrogênio que outros metais, mas a diferença entre a quantidade dissolvida no estado sólido e líquido é muito grande, tornando difícil a sua eliminação durante a solidificação.

A solubilidade do hidrogênio no alumínio aumenta com a temperatura e com a raiz quadrada da pressão (como será demonstrado posteriormente), indicando que, neste caso, o hidrogênio está no estado monoatômico ou possivelmente combinado como um hidreto que contenha um átomo de hidrogênio.

As reais solubilidades líquida e sólida do hidrogênio no alumínio puro, logo acima e abaixo do ponto de fusão são 0,65 e 0,034 ml/100g respectivamente. Estes dados podem ser obtidos, em função da temperatura, e para pressões aproximadamente constantes e muito próximas da atmosfera (condições em que operam os fornos de fusão e tratamento de alumínio), através de uma fórmula empírica, expressa da seguinte forma:

$$S = e^{k_2 - k_1/T}$$

onde S é a solubilidade, k_1 e k_2 são constantes experimentais e T a temperatura.

Segundo os experimentos de Ransley, as constantes k1 e k2 assumiram os valores de -2760 e 2,79 respectivamente, para S em cm³/100g e T em Kelvin. Logo:

$$\text{Log } S = - 2760 / T + 2,79$$

Como a solubilidade do hidrogênio no alumínio cresce exponencialmente com a temperatura é importante que as temperaturas excessivamente altas (acima de 680°C) sejam evitadas durante a fusão, minimizando assim a absorção do gás. A Fig.1 mostra a solubilidade do hidrogênio no alumínio em função da temperatura.

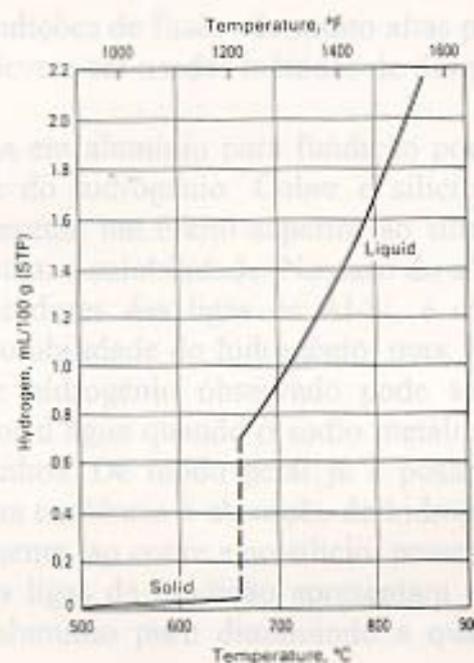


Fig.1 - Solubilidade do hidrogênio no alumínio.

Para o caso do alumínio sólido, a equação de Ransley resultou:

$$\text{Log } S = 2080 / T + \log p - 0,65$$

Observamos facilmente, tanto na Fig.1 como na equação acima, que, apesar da solubilidade obedecer aproximadamente à mesma proporcionalidade com relação à temperatura, tanto na faixa sólida quanto na líquida, ela, na região de transição, apresenta uma descontinuidade muito acentuada, sugerindo uma queda abrupta durante o processo de fabricação (com p constante).

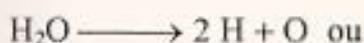
Como o processo é relativamente rápido, nem todo o hidrogênio sairá do metal, permanecendo como precipitado na rede cristalina ou como hidrogênio diatômico.

Também é importante ressaltar, que os limites de solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido (puro) são muito mais altos que a faixa de 0,3 a 1,00 ml/100g encontrada nas boas práticas de fundição, indicando que uma desgaseificação espontânea ocorre de maneira relativamente rápida durante as operações de manuseio do banho, ou que a oportunidade para a solução do hidrogênio do ambiente, ou atmosferas de produtos de combustão, é limitada pela barreira de óxido de alumínio na superfície do banho. Mesmo assim as quantidades normalmente dissolvidas sob boas condições de fusão são muito altas para a produção de fundidos de qualidade, portanto devem ser usados métodos de desgaseificação.

Elementos de liga em alumínio para fundição podem tanto aumentar quanto diminuir a solubilidade do hidrogênio. Cobre e silício diminuem a solubilidade (sendo que o cobre apresenta um efeito superior ao silício neste aspecto). Titânio, ferro e magnésio aumentam a solubilidade. No caso do sódio e do estrôncio, que são utilizados como modificadores das ligas de Al-Si, é dito que o efeito ocorre no sentido de aumentar a solubilidade do hidrogênio, mas, para o sódio, o aumento do nível de porosidade de hidrogênio observado pode ser devido à introdução de hidrocarbonetos ou vapor d'água quando o sódio metálico ou sais reativos de sódio são adicionados aos banhos. De modo geral já é possível prever que as ligas de alumínio apresentam uma tendência à absorção de hidrogênio menor que o alumínio puro, devido, principalmente, ao cobre e ao silício, presentes na maioria das ligas de fundição. Além disso as ligas de fundição apresentam temperaturas de fusão e de trabalho inferiores ao alumínio puro diminuindo a quantidade de hidrogênio em equilíbrio no banho.

3.1.2 - Fontes de hidrogênio

- Dissociação da umidade a altas temperaturas: É normalmente a principal fonte e ocorre segundo a reação:



- Filmes de hidróxido de alumínio da carga: O alumínio quando estocado ao ar livre reage com a umidade do ar, gerando $\text{Al}(\text{OH})_3$, o qual, em contato com o metal, causa a formação de uma camada de óxido que solubiliza por último, mesmo que a

metal líquido, além da possibilidade de causar acidentes por explosão, sofre a seguinte reação:



- Atmosfera do forno: Fornos a combustíveis fósseis, muitas vezes utilizados para a fusão podem gerar hidrogênio livre por causa da combustão incompleta do óleo combustível ou gás natural (hidrocarbonetos - H_xC_x , Ex.: gás GLP ou gás de cozinha é composto de butano e propano, C_4H_{10} e C_3H_8 respectivamente).

- Mudanças de material: Lingotes, sucata e retornos de fundição podem conter óxidos, areia, lubrificantes utilizados no processo e outros restos. Todos estes contaminantes são fatores potenciais de hidrogênio através da redução de compostos orgânicos ou decomposição do vapor d'água da umidade.

- Fluxos: A maioria dos sais de fluxo utilizados no tratamento do banho de alumínio são higroscópicos. Fluxos úmidos podem conseqüentemente resultar em um "carregamento" de hidrogênio para o banho, resultante da decomposição da água.

- Componentes externos: As ferramentas utilizadas no forno, como espumadeira e colheres podem passar hidrogênio para o banho se não estiverem cuidadosamente limpas. Refratários dos fornos, a calha, a bateia, pedaços quebrados de panela e a própria panela de vazamento são também fontes potenciais de hidrogênio, especialmente se os refratários não estão totalmente curados (sinterizados). As ferramentas utilizadas devem ser estocadas bem secas, e devem passar por pré-aquecimento antes do uso. Temperatura de pré-aquecimento 120°C.

- Reações entre o metal e o molde: Se o fluxo de metal é excessivamente turbulento durante o vazamento, o ar pode ser aspirado para dentro do molde. Se este ar não puder ser expelido antes de começar a solidificação, pode resultar em hidrogênio no banho. Sistemas de canais mal dimensionados podem também causar turbulência e sucção. Excessiva umidade nos moldes de areia podem resultar em uma fonte de hidrogênio quando a água se transforma em vapor.

3.1.3 - Efeitos do hidrogênio

Quando o hidrogênio dissolvido no banho não puder ser completamente expelido das peças fundidas antes da solidificação, tendem a aparecer defeitos como porosidade. As porosidades podem ser muito finas, amplamente dispersas ou localizadas em algumas áreas do fundido que solidificam por último, mesmo que a

concentração deste gás seja baixa. Micro porosidades provocadas por hidrogênio podem não ser particularmente prejudiciais, exceto quando tensões ocasionadas por pressões estejam presentes na peça fundida. (Ex.: filtro de óleo). Por outro lado, alguns defeitos provocados por porosidades de gás podem ser razoavelmente amplos, e eles aparecem como bolhas de gás ou trincas.

É importante diferenciar entre uma verdadeira porosidade de gás e uma porosidade de contração. A forma, devido a presença do gás retido, apresenta defeitos arredondados e brilhantes em uma análise metalográfica. Os defeitos provocados por porosidade de contração são devidos a uma inadequada alimentação do metal (cálculo do sistema de canais inadequado) durante a solidificação final. As porosidades devidas a contração são freqüentemente mais irregulares e planas que as porosidades de gás.

Defeitos de porosidades resultam na perda de propriedades mecânicas nas ligas de alumínio. A fig.2 mostra o efeito das porosidades de hidrogênio nas propriedades mecânicas da liga 356.

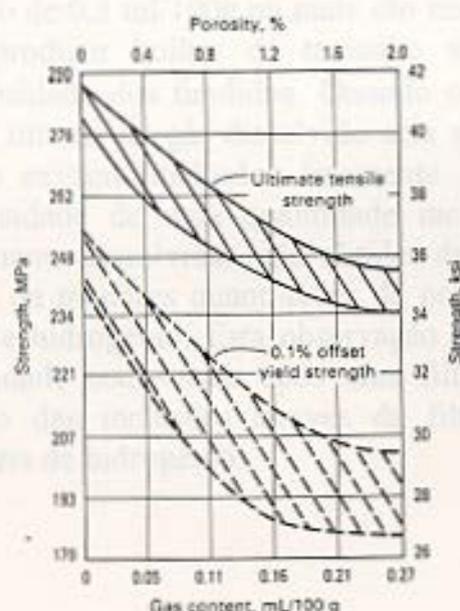


Fig.2 - Influência do teor de gás na tensão de ruptura e tensão de escoamento da liga de alumínio 356.

Uma certa quantidade de gás retido no alumínio retido durante a solidificação pode ser benéfica. Fundidos em moldes permanentes, freqüentemente, possuem algum hidrogênio que não foi removido ou expelido ou algumas vezes o gás é ainda

adicionado. Este gás retido equilibra a solidificação grossa, ajuda no completo preenchimento do molde, não diminui as características da superfície e afeta pouco as propriedades mecânicas exigidas pela maioria dos fundidos comerciais. Uma alta taxa de coquilhamento (resfriamento) e solidificação do fundido em molde permanente facilita a “aceitação” do hidrogênio; uma taxa de solidificação rápida geralmente resulta em tamanho de grão pequeno e aumenta as propriedades mecânicas. O mesmo é verdade para fundidos sob pressão, nos quais uma solidificação extremamente rápida reduz a tendência ao aparecimento de porosidades provocadas por hidrogênio.

De acordo com o que já foi dito, se um banho de alumínio estiver saturado de hidrogênio na sua temperatura de fusão, aproximadamente 95% do gás será expelido (mas não eliminado) durante a solidificação, contribuindo para a tendência a formação de porosidades nas peças. A palavra tendência é usada porque o tamanho e a quantidade deste tipo de defeito não é exclusivamente uma função da quantidade de hidrogênio dissolvido no banho.

A formação de bolhas de hidrogênio, que é a fase inicial que leva à porosidade, é fortemente resistida pela tensão superficial do metal líquido. Concentrações de hidrogênio de 0,3 ml/100g ou mais são necessárias na ausência de inclusões dispersas para produzir bolhas de tamanho suficiente para afetar a densidade ou nível de porosidade dos fundidos. Quando o teor de hidrogênio for dessa magnitude, a pressão interna do gás dissolvido será suficiente para superar a tensão superficial. Quando existem inclusões finamente dispersas suspensas no banho, pode resultar porosidade de uma quantidade menor de hidrogênio. Na ausência de inclusões finamente dissolvidas, são obtidas densidades mais altas, ou seja, pequenas porosidades ou menores quantidades de porosidade serão possíveis com quantidades maiores de hidrogênio. Esta observação é baseada em resultados obtidos em testes de densidade com vácuo após uma filtragem do metal. Como mostra a tab.1, a remoção das inclusões através da filtragem fez aumentar a densidade para todos os níveis de hidrogênio.

Teste de densidade a vácuo, g/cm³ Quantidade de hidrogênio, ml/100g

Antes da filtragem	Depois da filtragem	Antes da filtragem	Depois da filtragem
2,28	2,64	0,76	0,70
2,48	2,70	0,51	0,53
1,99	2,76	0,38	0,43
1,94	2,66	0,31	0,36
2,29	2,77	0,29	0,27
2,35	2,78	0,23	0,26
2,16	2,76	0,19	0,19

Tabela 1 - Efeito da filtragem do alumínio na sua densidade (porosidade) em comparação com o teor de hidrogênio (avaliado quantitativamente). ⁽¹⁾

3.2 - Método de controle: Teste Straube - Pfeiffer

O teste Straube - Pfeiffer (teste de redução de pressão) para a medição de hidrogênio, é um método qualitativo comumente utilizado. Uma pequena amostra de metal fundido é colocada em um cadinho e em seguida numa câmara, a qual é então evacuada para uma pressão específica que permanece até a solidificação do metal. A evolução de bolhas durante a solidificação e a aparência da superfície do cadinho são indicativos da quantidade de hidrogênio presente. Uma cabeça em forma de cogumelo indica uma amostra gasosa, enquanto uma superfície contraída da amostra (do cadinho) poderia indicar uma amostra relativamente livre de gás. A amostra solidificada é freqüentemente seccionada e a porosidade evidente é comparada com uma série de padrões conforme a figura 3.

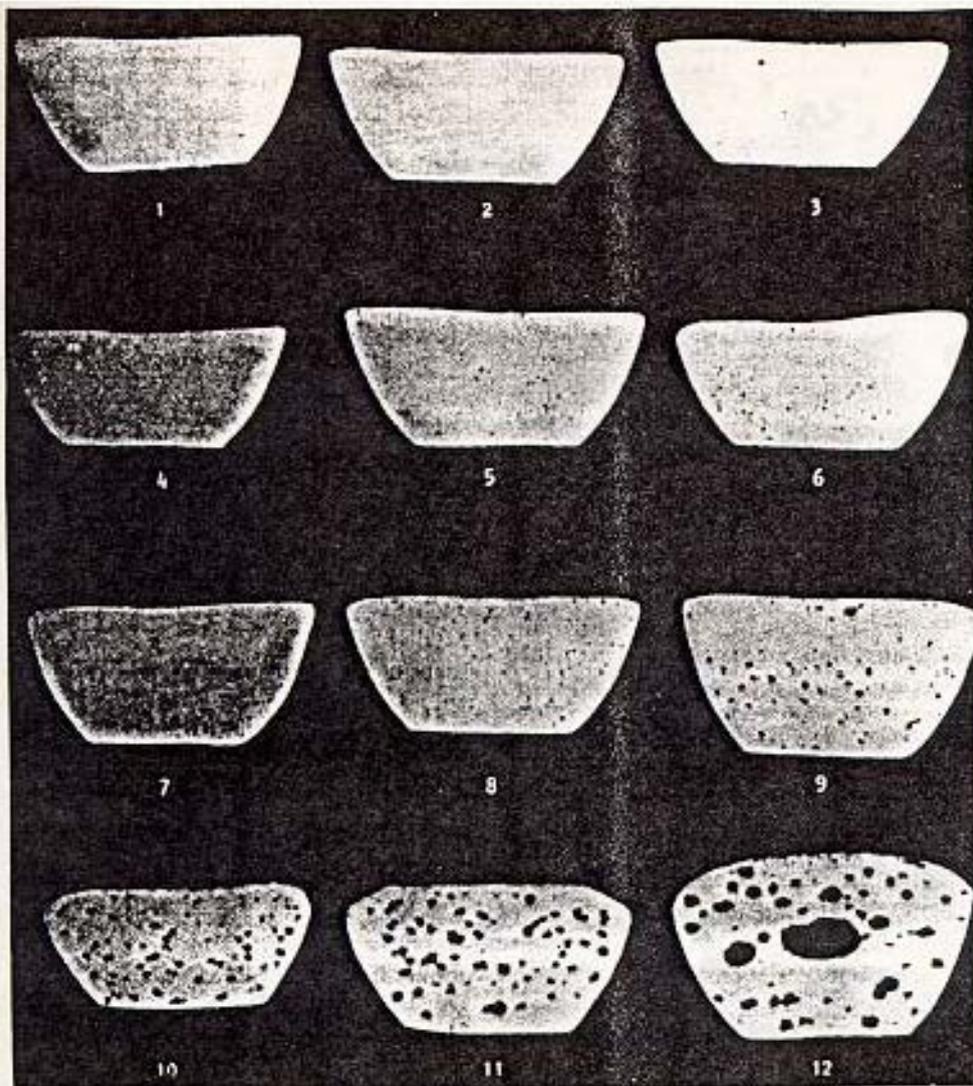


Fig.3- Padrões para comparação com amostra do teste de baixa pressão usado para checar a quantidade de gás hidrogênio presente na liga de alumínio. Esses padrões foram desenvolvidos para uma dada liga e calibrados com as condições do teste.

É importante especificar a pressão reduzida para se conseguir repetição para o ensaio, afim de se poder fazer comparações válidas. A fig.4 mostra o efeito de diferentes pressões em amostras contendo a mesma quantidade de gás.

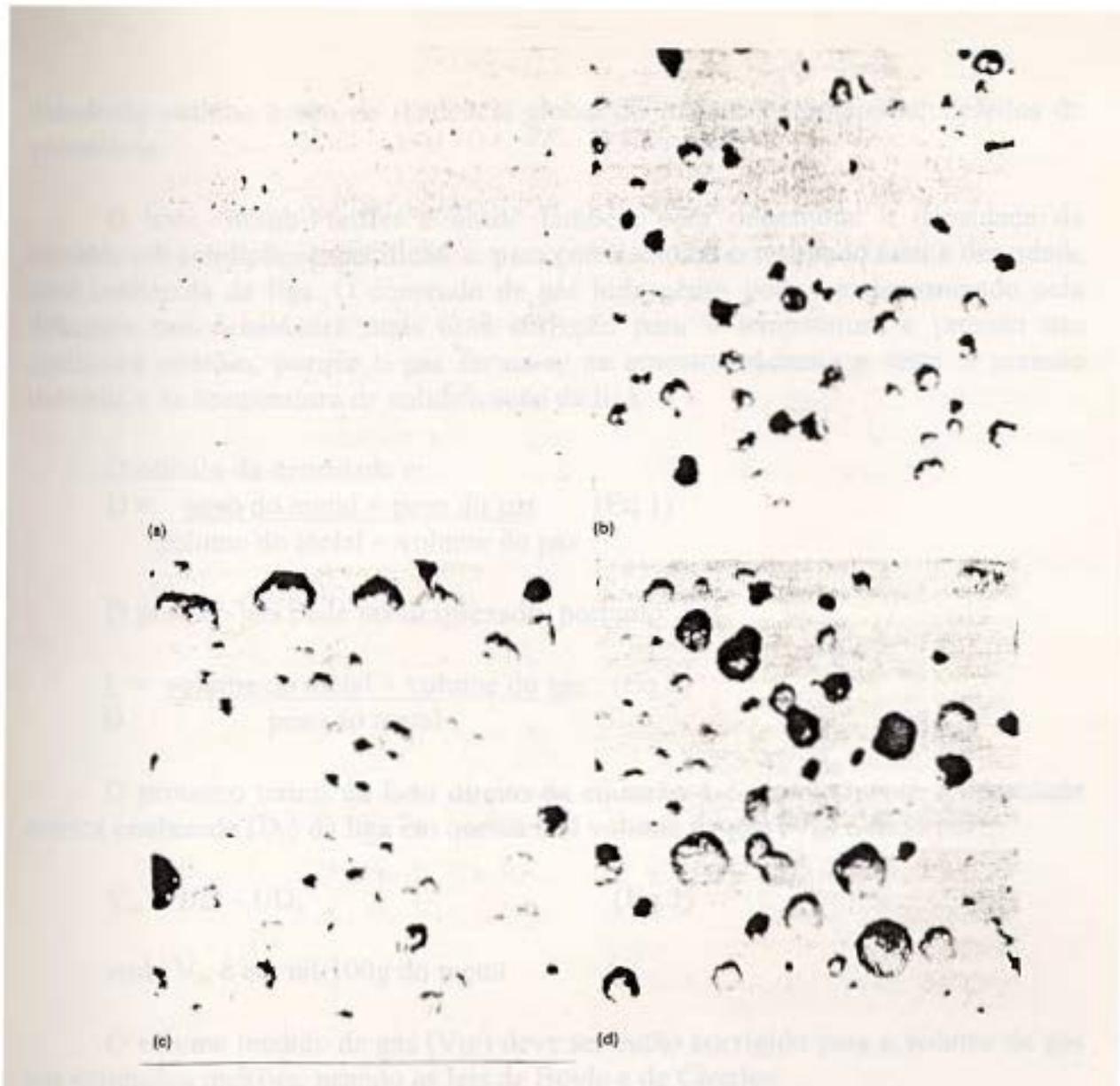


Fig.4- Efeito de diferentes pressões em amostras contendo a mesma quantidade de gás. a) 100 kPa (760 torr). b) 12 kPa (90 torr). c) 6 kPa (45 torr). d) 3 kPa (22,5 torr).

Esses padrões podem ser correlacionados com o resultado da determinação analítica do hidrogênio ou com critérios individuais do próprio fundidor e aceitação por parte do cliente. Cada padrão utilizado deve ser avaliado para cada liga individual do fundido e da prática e experiência em fundição.

No teste Straube - Pfeiffer, o comportamento da amostra é influenciado pela "limpeza" do metal fundido (como já foi dito antes - inclusões), assim como pelo hidrogênio. Inclusões irão nuclear bolhas de gás hidrogênio durante a solidificação, portanto, o teste não fornece uma medida absoluta ou efeito do hidrogênio

dissolvido sozinho e sim da tendência global do material à apresentar defeitos de porosidade.

O teste Straub-Pfeiffer é usado também para determinar a densidade da amostra sob condições específicas, e, para correlacionar o resultado com a densidade total conhecida da liga. O conteúdo de gás hidrogênio pode ser determinado pela diferença nas densidades mais uma correção para a temperatura e pressão nas condições padrões; porque o gás forma-se na amostra, durante o teste, à pressão reduzida e na temperatura de solidificação da liga.

O cálculo da densidade é:

$$D = \frac{\text{peso do metal} + \text{peso do gás}}{\text{volume do metal} + \text{volume do gás}} \quad (\text{Eq.1})$$

O peso do gás pode ser desprezado, portanto:

$$\frac{1}{D} = \frac{\text{volume do metal} + \text{volume do gás}}{\text{peso do metal}} \quad (\text{Eq.2})$$

O primeiro termo do lado direito da equação 1 é simplesmente a densidade teórica conhecida (D_0) da liga em questão. O volume de gás (V_m) é dado por:

$$V_m = 1/D - 1/D_0 \quad (\text{Eq.3})$$

onde V_m é em ml/100g do metal

O volume medido de gás (V_m) deve ser então corrigido para o volume de gás nas condições padrões, usando as leis de Boyle e de Charles:

$$V_{stp} = \frac{\text{pressão do teste}}{760} \times \frac{273}{273 + \text{temp. de solid. da liga}} \times V_m \quad (\text{eq.4})$$

onde a pressão do teste é em mm/Hg (torr) e a temperatura de solidificação da liga em °C. Finalmente:

$$V_{stp} = k/D - k/D_0 \quad (\text{eq.5})$$

onde k é uma constante e V_{stp} é em ml/100g de metal.

Um k diferente deve ser calculado para cada liga e condições de teste fixadas. Para uma dada liga, entretanto, é possível desenvolver uma relação entre densidade e

conteúdo de hidrogênio atual. Densidades de amostras com conteúdo variável de gás podem ser medidas pelo princípio de Arquimedes de pesagem no ar e água:

$$D = \frac{W_a}{W_a - W_r} \quad \text{onde: } W_a \text{ e } W_r \text{ são os pesos no ar e na água, respectivamente.}$$

Ábacos podem ser desenvolvidos a partir de resultados derivados, assim como o conteúdo de hidrogênio pode ser determinado diretamente da determinação do peso do teste de pressão reduzida, preferencialmente por manipulação matemática. A figura 5 mostra um ábaco desenvolvido para uma liga de alumínio 1100, que mostra a pressão da primeira bolha observada, com o conteúdo de hidrogênio.

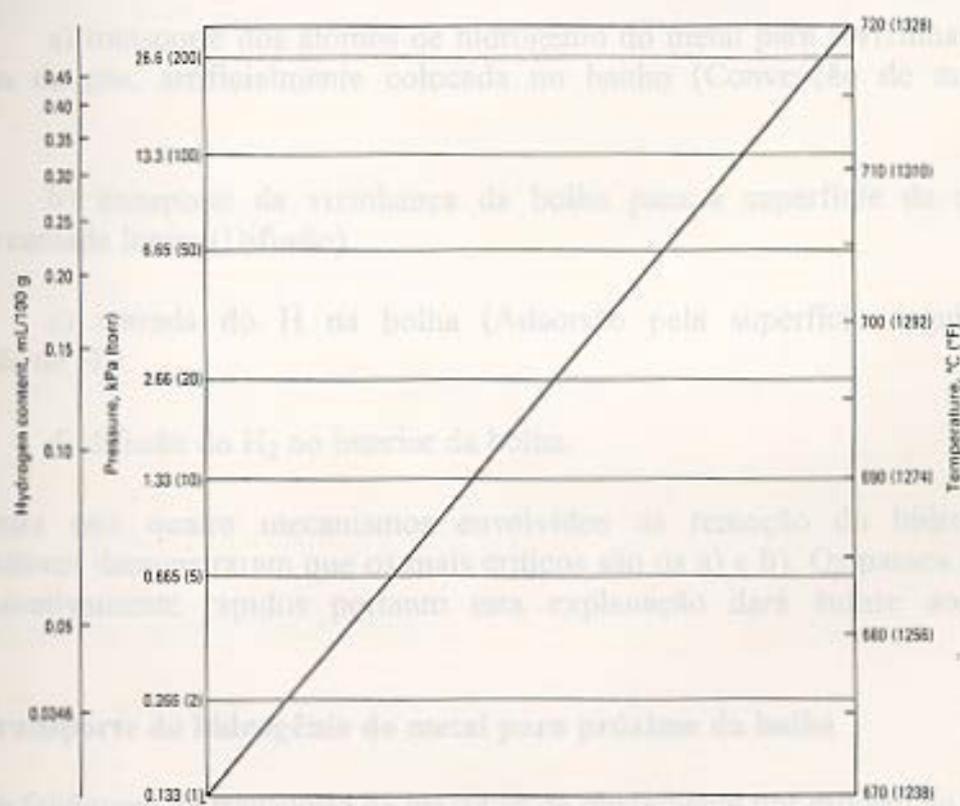
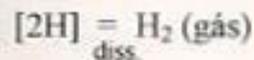


Fig.5 - Ábaco desenvolvido para uma liga de alumínio 1100, que mostra a pressão da primeira bolha observada, com o conteúdo de hidrogênio. Temperatura do banho, 730°C; fluxo de gás, 6 l/minuto.

3.3 - Desgaseificação

3.3.1- Princípios da remoção do hidrogênio

O hidrogênio em solução no alumínio apresenta uma alta pressão de vapor se comparada com aquela dos demais solutos. Esta propriedade é fundamental para que se consiga a remoção do hidrogênio através de injeção de gás. O transporte de massa se dá então no sentido inverso da reação de dissolução (comentada no item x.x):



Esta reação envolve, seqüencialmente:

a) transporte dos átomos de hidrogênio do metal para a vizinhança de uma bolha de gás, artificialmente colocada no banho (Convecção de massa e Difusão).

b) transporte da vizinhança da bolha para a superfície da mesma através da camada limite (Difusão).

c) entrada do H na bolha (Adsorsão pela superfície seguida de desadsorsão de H₂).

d) difusão do H₂ no interior da bolha.

Dentre este quatro mecanismos envolvidos na remoção do hidrogênio, diversos autores demonstraram que os mais críticos são os a) e b). Os passos c) e d) são comparativamente rápidos portanto esta explanação dará ênfase aos dois primeiros.

- Transporte do hidrogênio do metal para próximo da bolha

Este fenômeno de transporte de massa se dá obviamente por difusão no estado líquido. Pela primeira lei de Fick temos:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial X} \quad (\text{eq. 3})$$

onde,

J = fluxo de massa na unidade de tempo

D = constante de difusão (constante de proporcionalidade)

C = concentração de um elemento que se difunde

X = direção de difusão

Se nos reportarmos à lei de Sievert, temos que:

$$S = \text{solubilidade} = K \cdot \sqrt{P_{H_2}}$$

É correto, então, afirmar que a concentração do hidrogênio também apresentará proporcionalidade à raiz quadrada de sua pressão de vapor.

$$C = K' \sqrt{P_{H_2}}$$

A pressão parcial de H_2 na bolha, sendo P_b , e a pressão de vapor de H_2 no metal sendo P_{H_2} , e admitindo-se que C é constante no interior do banho, vale escrever:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial X} \qquad -D \frac{\Delta C}{\Delta X}$$

$$\Delta C = c_{\text{metal}} - c_{\text{bolha}}$$

$$\Delta C = K' \sqrt{P_{H_2}} - c_{\text{bolha}}$$

$$c_{\text{bolha}} = \text{concentração de hidrogênio na bolha} = K' \sqrt{P_b}$$

assim,

$$J = D (K' \sqrt{P_{H_2}} - K' \sqrt{P_b}) / \Delta X$$

rearranjando as constantes teremos:

$$J = -D K' (\sqrt{P_{H_2}} - \sqrt{P_b}) / \Delta X$$

Esta equação mostra que a taxa de transporte do hidrogênio do seio do metal para a vizinhança da bolha é:

- Diretamente proporcional à diferença de pressão de vapor. Este fato não oferece problema, pois as pressões de vapor do hidrogênio dissolvido no alumínio são bastante altas e, portanto, sob este aspecto, o fluxo é sempre favorecido.

- Inversamente proporcional à distância do átomo de hidrogênio à bolha. Este fato é crítico, pois indica que precisamos cada vez de mais bolhas se quisermos tê-las sempre próximas a átomos de hidrogênio.

Além disso conclui-se intuitivamente que quanto maior agitação tivermos no banho líquido, mais probabilidade estaremos criando de aproximar os átomos de hidrogênio de bolhas injetadas no banho.

- Transporte de hidrogênio da vizinhança da bolha através da Camada-Limite

O fenômeno de transporte de massa nessas condições é mais complexo do que a difusão baseada em diferença de concentração, pois entram em questão duas outras variáveis de interesse:

- Tempo de residência da bolha
- Área da bolha

A comparação da importância destas duas variáveis pode ser feita intuitivamente pois:

- Se o tempo de residência da bolha aumenta, é razoável admitir que haverá mais tempo para o transporte de massa de hidrogênio e vice-versa.

- Se a área das bolhas aumenta, mais superfície de reação haverá disponível e vice-versa; é também intuitivo que, para um dado volume de gás injetado para formar bolhas, maior será a área total quanto menores forem as bolhas e vice-versa.

Esta situação foi estudada por Sigworth e Engh e chegou-se à seguinte equação:

$$K (C_{H_2} - C_b) \cdot A = G \cdot K' \quad (\text{eq. 346})$$

onde:

C_{H_2} = concentração de hidrogênio no metal

C_b = concentração de hidrogênio na bolha

G = Taxa de adição de gás formador de bolha

A = área total das bolhas.

K, K' = constantes de proporcionalidade

Esta equação nos mostra a importância da área das bolhas. Como esta área é uma área crítica para o transporte de massa, não é intuitivo que as duas variáveis citadas sejam as limitantes do processo, para uma dada vazão de gás e uma dada concentração de hidrogênio no banho.

Na realidade, se observarmos todos os estudos e pesquisas de degaseificação, veremos que o que se tenta é justamente fazer com que se maximize o tempo de residência das bolhas e sua área total.

Ainda deve ser comentado que os fenômenos de superfície podem ainda remover impurezas. Desta forma, as bolhas podem contribuir na remoção deste tipo de material, sendo todavia de efeito quantitativo marginal.

3.3.2 - Métodos de degaseificação

Vários métodos são utilizados para a degaseificação do alumínio. Um método simples é manter o metal à baixa temperatura por algum tempo, pois à temperaturas reduzidas a solubilidade do hidrogênio é baixa e isto faz com que haja uma saída natural do gás. adicionalmente, as condições do fundido que permitem uma solidificação com expulsão natural de hidrogênio sem porosidade conseqüente são desejáveis. Entretanto estas condições nem sempre são possíveis. A degaseificação intencional do banho pode ser efetuada das seguintes maneiras:

- Com gás de limpeza ou de lavagem;
- Tablete de fluxo degaseificante;
- Degaseificação com agitação mecânica.

3.3.2.1 - Gás de limpeza (lança)

Um método simples de degaseificação do alumínio fundido é feito injetando-se um gás de limpeza ou mistura de gases a baixa pressão através de um tubo, cano, lança ou vara. Os tubos são de ferro fundido revestidos com cerâmica ou aço revestido com cerâmica, ou mais frequentemente usa-se tubos de grafite.

Um gás de limpeza serve para coletar o hidrogênio, porque a pressão parcial de um gás coletor é menor do que a vizinhança e menor que a pressão parcial do hidrogênio dissolvido no banho (os mecanismos de remoção serão detalhados posteriormente). O hidrogênio difunde para dentro da bolha de gás, sendo carregado para a superfície do banho e expelido para a atmosfera.

O gás de limpeza pode ser: inerte (argônio ou nitrogênio) ou reativo (cloro e freon). Gases reativos são usados em pequenas concentrações, abaixo de 10%, quando comparados com gases inertes. Os gases reativos sofrem uma reação química com o banho. O gás cloro reage com o alumínio fundido e forma o gás $AlCl_3$, o qual depois serve como gás de limpeza. No caso do gás freon (CF_3Cl), o flúor reage e forma AlF_3 (uma fase sólida).

Cloro e flúor tem efeitos muito favoráveis na tensão superficial da bolha e no “molhamento” sem influir nas inclusões do banho. Portanto, o gás de limpeza que usa estes dois elementos (redução na tensão superficial e molhamento) pode ser usado para promover uma desgaseificação eficiente através de uma maior coalescência do hidrogênio e inclusões complexas de hidrogênio. Entretanto, apesar do cloro ser efetivo como gás de limpeza, ele é muito tóxico, e com resultados consideráveis sobre os efluentes. Portanto ele é quase sempre usado com um gás inerte.

Uma mistura de nitrogênio, cloro e monóxido de carbono (CO) tem sido usada com muito sucesso para a desgaseificação. Esta mistura de três fases e freon é reportada como sendo de baixa emissão de gases tóxicos ou efluentes, comprometendo menos a natureza do que somente cloro ou cloro misturado com gás inerte.

Os resultados da remoção de hidrogênio com gás de limpeza são mais benéficos quando se utiliza gás cloro ou misturas com cloro ao invés de gases inertes ou freon sozinho. A fig.6 compara a desgaseificação concluída com argônio e nitrogênio.

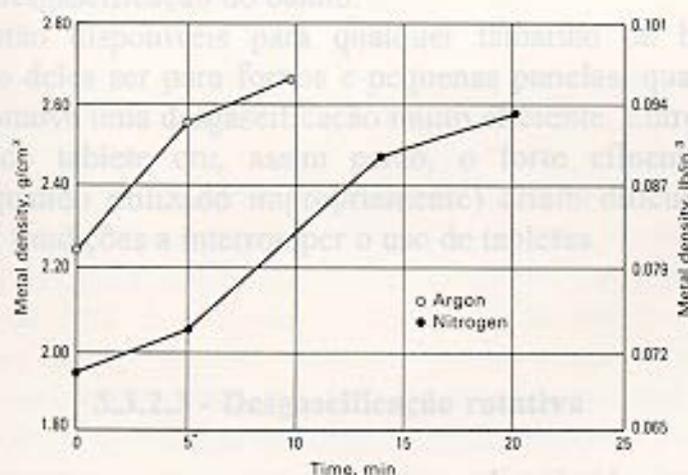


Fig.6: Efeito relativo do gás de limpeza na desgaseificação da liga de alumínio 319 sob um fluxo constante de gás.

3.3.2.2 - Desgaseificação com hexacloretano

Talvez o mais comum método de desgaseificação em fundição seja o uso do hexacloretano (C_2Cl_6) em tabletes. O tablete decompõe-se no alumínio fundido na forma gasosa $AlCl_3$. Bolhas de gás $AlCl_3$ crescem e coletam o gás hidrogênio levando-o para a superfície do banho onde ele se desprende para a atmosfera. Os tabletes podem ainda conter sais de fluxos para ajudar a “molhar” as inclusões de óxidos dentro do banho e desta maneira possibilitar alguma remoção de gás hidrogênio associado com inclusões.

Para ser totalmente efetivo, os tabletes devem ser mantidos secos e deveriam ser tamponados (com substâncias que mantêm o Ph estável); as ferramentas de imersão (sino de mergulho) do tablete devem também estar secas. As ferramentas devem ter preferencialmente um recipiente do tipo campânula que é mergulhado para permitir o escape fácil das bolhas de gás.

A ferramenta mergulhadora (sino) deve estar no fundo do banho e os tabletes devem ser mantidos na posição até que uma diminuição das bolhas na superfície seja observada. Se isto não for feito, os tabletes, que têm baixa densidade, subirão e flutuarão na superfície do banho durante a decomposição, promovendo pouco ou nenhum efeito de desgaseificação do banho.

Tabletes estão disponíveis para qualquer tamanho de banho, apesar da principal aplicação deles ser para fornos e pequenas panelas. quando corretamente usado, o C_2Cl_6 promove uma desgaseificação muito eficiente. Entretanto, uma parte do odor nocivo do tablete cru, assim como, o forte efluente durante o uso (particularmente quando utilizado imprópriamente) criam dificuldades ambientais que forçam muitas fundições a interromper o uso de tabletes.

3.3.2.3 - Desgaseificação rotativa

O uso de gases puros ou misturas gasosas distribuídas com uma lança ou através de um tubo de desgaseificação, não é totalmente eficiente. A habilidade desse processo simples para desgaseificar depende do tamanho da bolha e da quantidade de área de contato entre as bolhas de desgaseificação e o banho. As bolhas são geralmente grandes e pouca mistura ocorre em banhos grandes ou vasos quando tubos ou lanças são usadas.

Uma melhoria significativa foi o desenvolvimento dos sistemas de injeção de gás rotativo.

O princípio do sistema de injeção rotativa (Fig.7) é a injeção de gás dentro da coluna ou eixo rotativo sendo liberado através de pequenas aberturas na base do rotor.

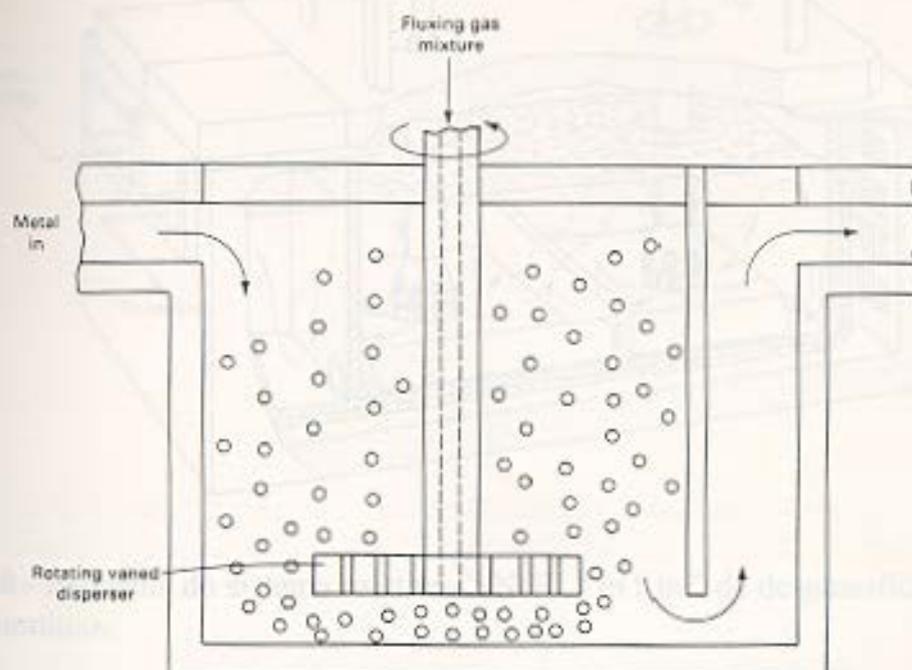


Fig.7 - Esquema rotativo "in line" de degaseificação

Quando a rotação atinge a velocidade de 300 a 500 rpm, o dispersador cisalha (corta) a bolha de gás liberada, produzindo uma ampla dispersão de finíssimas bolhas. A elevada razão entre área superficial e volume das bolhas do gás fornece grande aumento na área de contato e portanto aumento de reações cinéticas, resultando em uma degaseificação eficiente. O eixo rotativo também dispersa as bolhas mais uniformemente dentro do vaso de reação para fornecer uma mistura mais completa de metal com o gás de limpeza. A fig 8 mostra um típico sistema de degaseificação rotativa usado em operações primárias. Certos sistemas são dimensionados de acordo com o volume de metal, velocidade de escoamento do metal, e de acordo com cada gás (argônio, nitrogênio e cloro ou mistura desses gases). O nível de hidrogênio removido depende da velocidade de escoamento do gás, do conteúdo inicial de hidrogênio e da velocidade de um escoamento do metal. A maioria dos sistemas comerciais pode alcançar um conteúdo final de hidrogênio bem abaixo de 0,15 ml/100 g de metal.

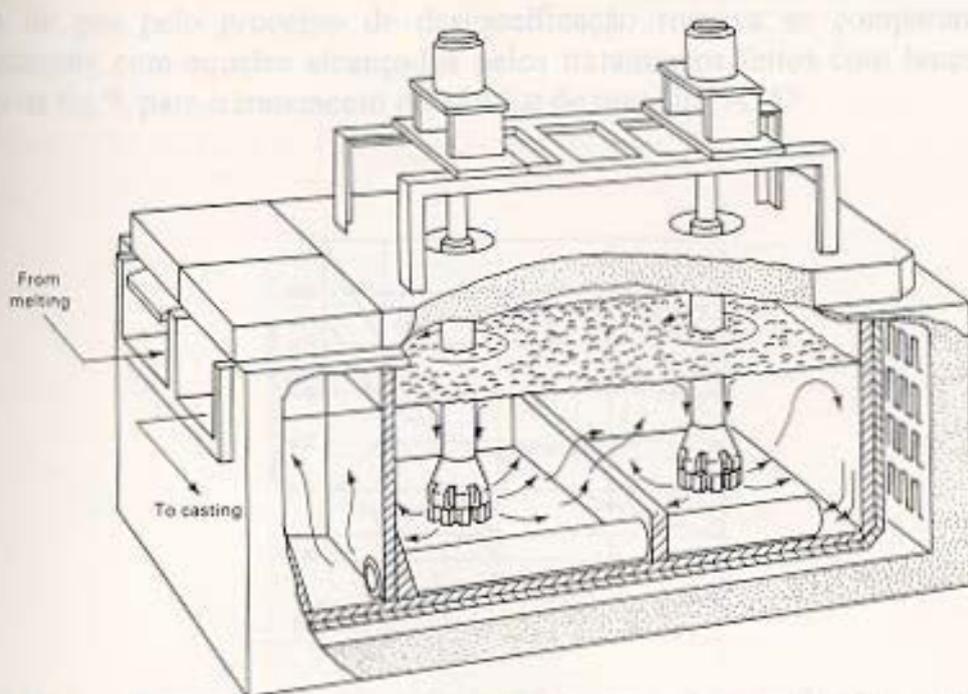


Fig.8 - Esquema do sistema rotativo "SNIF", "in line" de degaseificação para refinar o alumínio.

O desempenho da degaseificação é determinado por vários fatores inter-relacionados, incluindo o conteúdo inicial de hidrogênio, a velocidade de escoamento do metal, o tamanho do vaso (o qual determina o tempo de residência em conjunto com a velocidade de escoamento), a velocidade de escoamento do gás de limpeza, a capacidade (habilidade, capacidade de realizar) de mistura, a liga específica (fatores termodinâmicos e coeficientes de transferência de massa). Geralmente todos estes sistemas têm alcançado resultados de degaseificação satisfatórios.

Sistemas de degaseificação rotativa têm sido recentemente compactados para aplicações em fundição com bons resultados. O sistema de degaseificação é inserido diretamente dentro do cadinho ou dentro da panela com o metal, e o metal é degaseificado no processo antes do vazamento.

Existem combinações otimizadas de volume do gás de limpeza, relação do diâmetro do rotor com o diâmetro do cadinho, e número de revoluções por minuto da haste para uma melhor eficiência degaseificante sem turbulência excessiva. Uma relação do diâmetro do rotor com o diâmetro do cadinho de 20 a 25%, um número de revoluções por minuto de 350 a 450 rpm, e uma velocidade de escoamento de gás de 0,5 a 0,55 m³/hora são parâmetros tipicamente utilizáveis. Variações no desenho do rotor, entretanto podem alterar estes parâmetro. Os resultados alcançados com a

remoção de gás pelo processo de desgaseificação rotativa se comparam muito favoravelmente com aqueles alcançados pelos tratamentos feitos com lança. Isto é ilustrado na fig.9, para o tratamento de 180 Kg de uma liga A357.

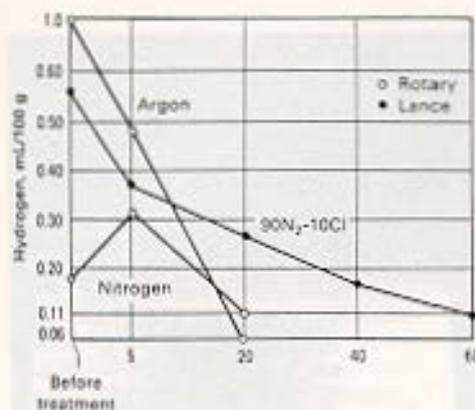


Fig.9 - Comparação da eficiência entre desgaseificador rotativo e desgaseificador com lança. Rotor de 150 mm de diâmetro, 375 rpm. Capacidade de 180 Kg de metal fundido.

3.3.2.4 - Outros sistemas mecânicos de desgaseificação

A circulação de gás injetado por bomba pode também ser usado para desgaseificação. A alta velocidade (60 a 1100 rpm) do rotor cisalha as bolhas que estão saindo do tubo de injeção e cria uma finíssima e ampla dispersão de bolhas. Em amplos fornos revérberos, o banho pode ser desgaseificado através da injeção e ação de bombeamento sem a necessidade de um bastão de escorificação. Desta maneira, a eficiência da desgaseificação e a eficiência energética são melhoradas, pois as tampas dos fornos não necessitam ser abertas, como no caso de um tubo ou lança escorificante. Grandes banhos (50ton) têm sido desgaseificados com sucesso para níveis de 0,15 ml/100g e abaixo disso com uma bomba injetora de gás.

Outros inventos vêm sendo usados para a desgaseificação na indústria primária, entre eles pode-se citar um em especial, trata-se de um tanque reator que provoca um redemoinho. O metal flui do redemoinho para o fluxo de gás, que é injetado através de uma série de bocais.

3.3.2.5 - Plug poroso para desgaseificação

Outro método para desgaseificação através de bolhas finas é o uso de um dispersador poroso no final de um tubo ou um plug poroso (Fig.10).

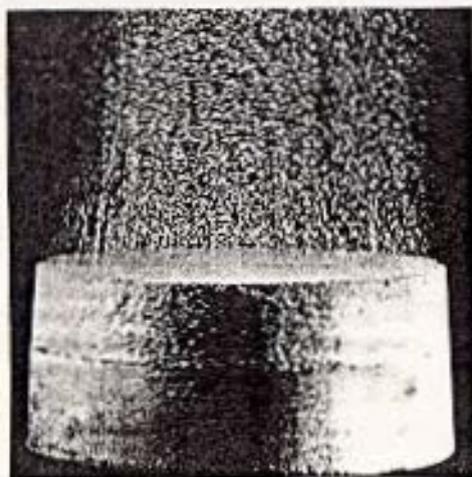


Fig 10 - Plug poroso de desgaseificação, (a) mostra finas bolhas produzidas na água. (b) Plug poroso instalado na parte inferior do vaso (panela).

Plugs porosos são materiais cerâmicos ou grafitas com uma finíssima porosidade, através da qual o gás se dispersa. Esses plugs podem ser instalados na parte inferior da panela, fornos ou em vasos de tratamento auxiliar. A fina porosidade do material do plug possibilita a geração de um tamanho fino de bolha (comparável com aquela da desgaseificação rotativa). Entretanto, a eficiência da desgaseificação está fortemente relacionada com o tempo de residência da bolha, velocidade de escoamento do gás, profundidade do banho, tamanho do vaso e da capacidade do plug poroso manter-se aberto para emissão de gás. O plug poroso para desgaseificação pode ser mais econômico do que os sistemas de desgaseificação rotativa, nos quais os rotores e eixos, geralmente grafita, requerem substituição periódica em virtude do desgaste e oxidação.

A fig.11 compara a desgaseificação obtida usando-se escoamentos idênticos de gás para plug poroso, lança e sistemas de desgaseificação rotativo mostrando que o plug poroso é mais efetivo do que a lança. Resultados satisfatórios de desgaseificação podem ser obtidos em muitas aplicações pelo controle do tamanho do vaso, pela velocidade de escoamento do gás e tempo de residência da bolha.

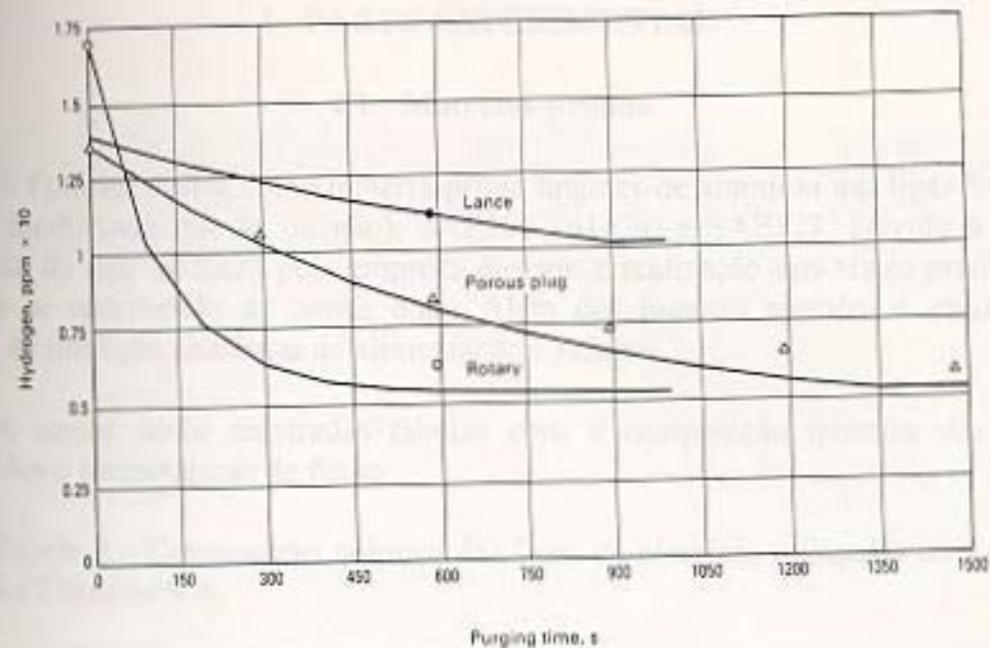


Fig.11 - Comparação da eficiência entre lança, plug poroso e desgaseificação rotativa para fluxos gasosos idênticos.

Recentemente, vem sendo introduzida uma combinação de sistemas de desgaseificação \ filtração. A câmara de desgaseificação é designada para acomodar os itens acima mencionados.

Esse sistema proporcionou um conteúdo final de hidrogênio de 0,06ml/100g para um fluxo de escoamento do metal abaixo de 40 Kg/min; e 0,14 ml/100g para um fluxo de escoamento de 330 kg/min.

4 - PARTE EXPERIMENTAL

4.1 - Matérias-primas

A Forjasul utiliza como matéria-prima lingotes de alumínio das ligas SAE305 (Al-Si, modificada por Sr ou não), SAE306 (Al-Cu) e SAE323. Devido à pouca utilização da liga SAE323 pela empresa durante a realização dos testes práticos os mesmos se restringirão às outras duas. Além dos lingotes também é utilizado o retorno de fundição (sistemas de alimentação e refugo).

A seguir serão mostradas tabelas com a composição química das ligas, densidades e temperaturas de fusão.

Tabela 2 - Composição química das ligas de alumínio utilizadas na Forjasul Materiais Elétricos S/A.

LIGA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Cr	Ti
SAE 305	11-13	1	0,6	0,35	0,1	0,5	0,5	0,15	-	-
SAE 306	7,5-9,5	1	3 - 4	0,5	0,1	0,5	1	0,35	-	-
SAE 323	6,5-7,5	0,5	0,25	0,35	0,25-0,4	-	0,35	-	-	0,25

Tabela 3 - Densidade e temperatura de fusão teóricas das ligas de alumínio utilizadas na Forjasul Materiais Elétricos S/A.

LIGA	DENSIDADE (g/cm ³)	T _{FUSÃO} (°C)
SAE 305	2,6572	578
SAE 306	2,7679	565
SAE 307	2,6849	585

4.2 - Equipamentos

Os equipamentos utilizados para a realização dos testes são, basicamente, aqueles utilizados normalmente na fundição de alumínio e os sistemas de degaseificação rotativo e com plug poroso.

- Forno de fusão:

Os lingotes são fundidos em um forno à indução de média frequência, que possui uma potência de 125 KW e uma capacidade de fusão de aproximadamente 80

Kg de alumínio por hora. O forno possui dois cadinhos, os quais funcionam alternadamente uma semana cada um.

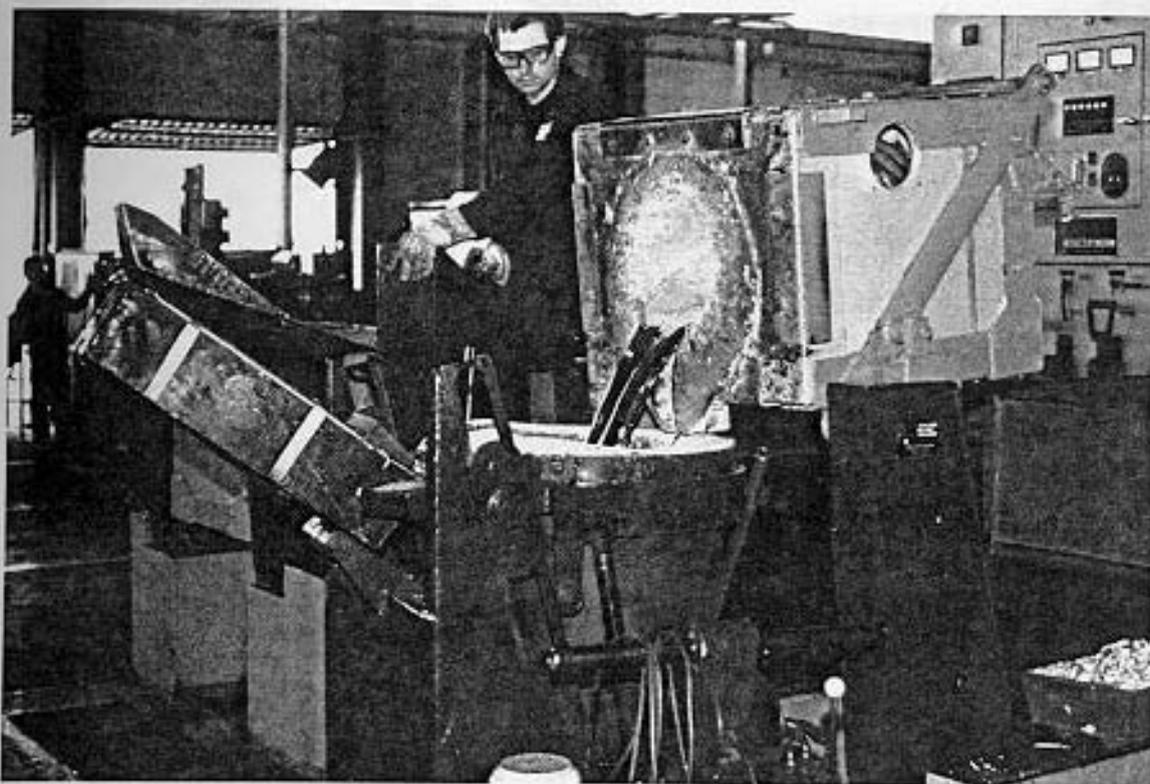


Fig.12 - Forno à indução em operação na Forjasul M.E. no momento do vazamento de uma carga de alumínio líquido para o cadinho de transporte

- Cadinho de transporte:

Este sistema tem como função o transporte e distribuição do alumínio líquido do forno à indução para os fornos de espera. É constituído de uma panela acoplada a uma base móvel que possui um sistema para efetuar o vazamento do material nos fornos de espera. O vazamento se dá através de uma calha revestida, que serve para alcançar o centro do forno de espera e diminuir a turbulência que tende a ocorrer quando o material é despejado.



Fig.13 - Cadinho de transporte em operação no abastecimento dos fornos de espera do setor de injetoras.

- Forno de espera:

A Forjasul possui oito fornos de espera, sendo que seis são usados normalmente para fundição de alumínio e dois para a fundição de Zamag.

Os fornos mantêm o metal aquecido através de resistências elétricas e trabalham com uma potência de 45 KW. Possuem uma capacidade de 250 Kg de alumínio e trabalham utilizando cadinhos de carbeto de silício.

Devido à necessidade de uma complementação de material, que é então fundido diretamente nos fornos de espera, os mesmos precisam trabalhar com uma temperatura um pouco elevada e, conseqüentemente, há um consumo maior de energia.

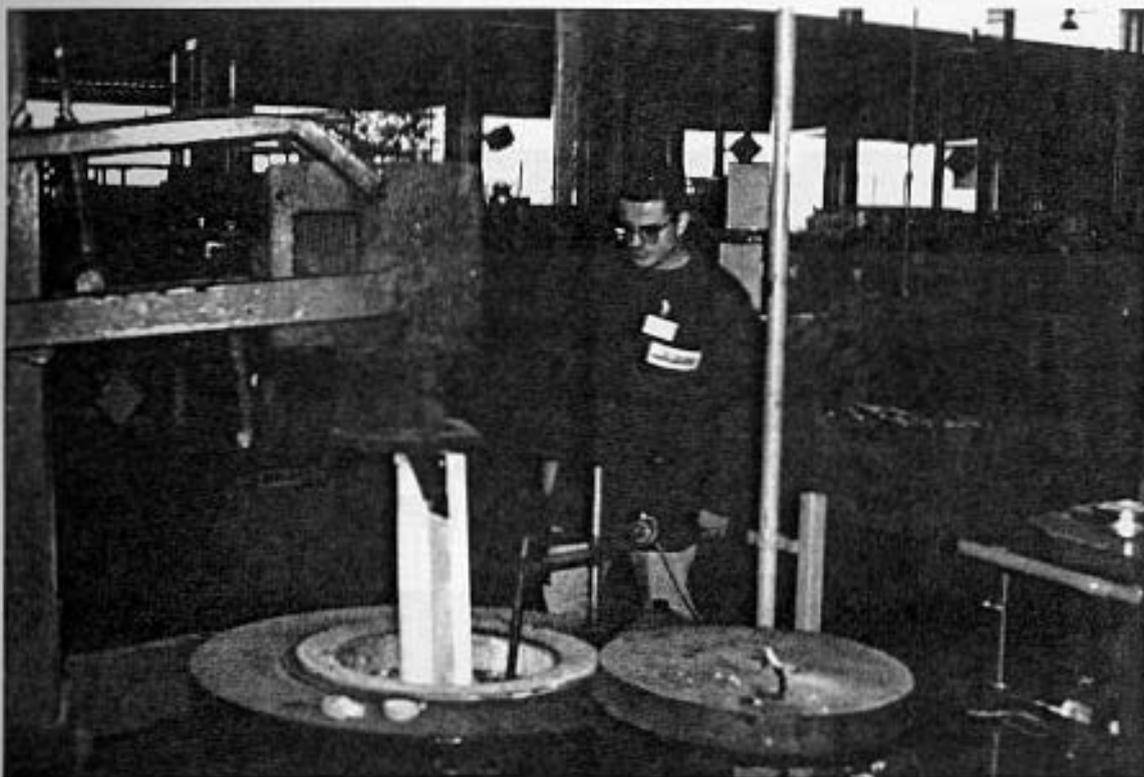


Fig.14 - Forno de espera para alumínio (parte inferior da fotografia) com o sistema de desgaseificação rotativa acoplado para o tratamento e termopar de imersão.

- Sistema de controle da quantidade de hidrogênio no banho:

O controle é feito através do teste Straube-Pfeiffer, ou seja, na realidade é determinado o efeito global do teor de hidrogênio e inclusões no banho, as quais, como já foi explicado, atuam no sentido de nuclear as bolhas de gás durante a solidificação.

O aparelho em questão é chamado Gás-Tech II e é fabricado pela Stahl Specialty Company (U.S.A.)

O sistema é composto por:

- uma câmara de vácuo, a qual possibilita a visualização da amostra durante a sua solidificação;
- uma base de alumínio;
- duas bombas de vácuo de diafragma;

- válvula ajustável;
- cadinho para amostragem;
- manômetro.

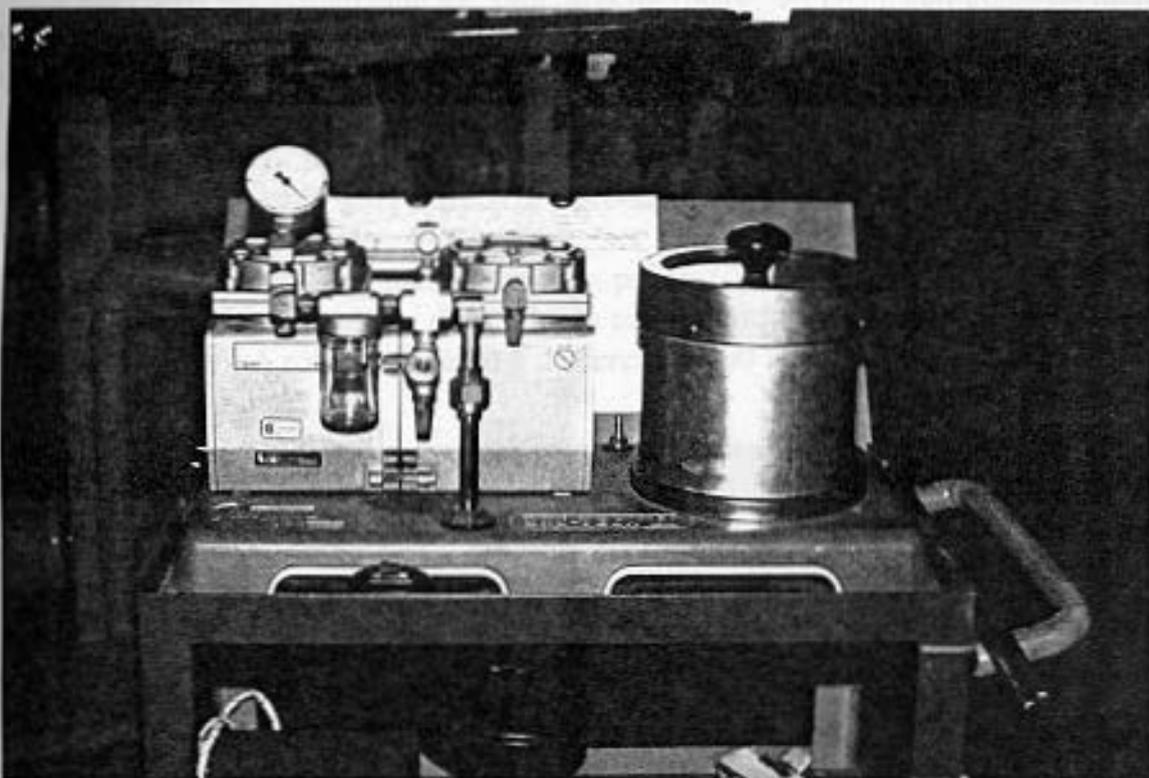


Fig.15 - Aparelho Gas-Tech II utilizado para análise da porosidade de amostras de alumínio.

- Lança / plug poroso:

Este sistema de degaseificação consiste simplesmente de um tubo de grafite, com 50 cm de comprimento e aproximadamente 7 cm de diâmetro externo, no qual é acoplado um plug poroso também feito de grafite e, pela outra extremidade, uma canalização proveniente do tubo do gás inerte (no caso Ar), o qual deve ter um controlador da vazão do mesmo.

- FDU (Fondry Degassing Unit) - Degaseificador Rotativo:

Para a realização dos testes com degaseificação rotativa foi utilizado um equipamento fabricado e comercializado pela Foseco. Este sistema foi cedido para a

realização de experiências, visando a sua implementação, e foi posto em funcionamento por um técnico da mesma empresa.

O princípio de funcionamento do FDU está descrito no item 3.2.1.4.

Como pode ser visualizado na fotografia da fig.16, o FDU é composto de uma estrutura que permite o seu transporte e possui um sistema de movimentação do eixo rotativo e do rotor.

Tanto o eixo como o rotor e as placas (que servem para evitar a formação de um vórtice no banho) são consumíveis e feitos de grafite, portanto devem ser devidamente pintados com tinta refratária e pré-aquecidos para sua proteção.

O funcionamento do FDU deve ser pré-estabelecido e previamente programado em função dos parâmetros do próprio processo de degaseificação (tempo, vazão de gás) e da altura do fundo do cadinho do forno de espera em que se realiza o tratamento. A rotação do eixo é de cerca de 400 rpm.

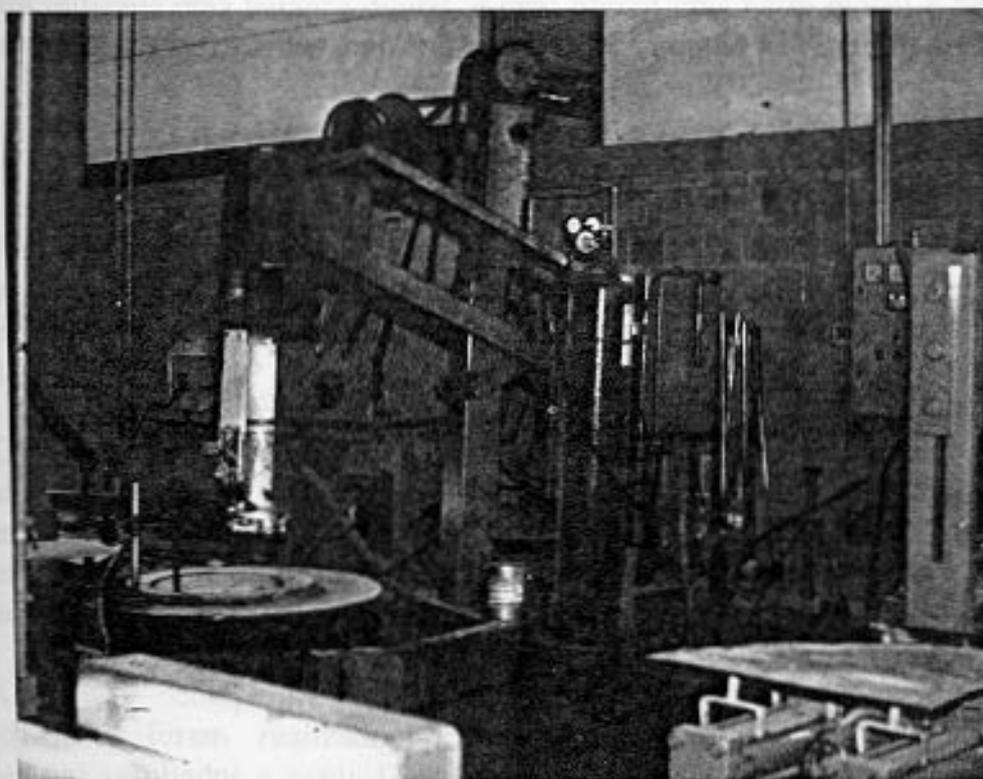


Fig.16 - Sistema de degaseificação rotativa - FDU (Foundry Degassing Unit)

- Tubo de Argônio:

É acoplado tanto ao FDU quanto ao plug poroso, sendo que o primeiro possui um compartimento especialmente para esta função.

O argônio foi fornecido pela White Martins com as seguintes especificações: gases especiais - ARG 4,8 ONU 10,06. Em um tubo contendo 10 m³ com pressão de 200 Kgf/cm².

- Termopar:

Foi utilizado um termopar de imersão conectado a um leitor digital.

- Balança:

Foi utilizada uma balança digital, a qual possui uma haste móvel e permite a determinação da densidade das amostras através do princípio de Arquimedes.

4.3 - Metodologia experimental

Para que fosse possível a compreensão dos fenômenos relacionados com a absorção e remoção do hidrogênio, bem como das características dos processos de degaseificação das ligas de alumínio, foram realizados vários experimentos práticos.

Como este trabalho foi realizado dentro do setor de produção da empresa, utilizando a sua infra-estrutura, teve-se a preocupação em não prejudicar o andamento normal do processo, de forma que as decisões tomadas, em termos das situações e objetivos dos testes, foram adequadas à esta situação, fato que não prejudicou de nenhuma maneira os experimentos e análises.

Antes da comparação propriamente dita entre os processos de degaseificação, foram realizados testes preliminares para prever possíveis distorções nos resultados e explicá-las. Além destes testes foi feita uma análise da eficiência do método de controle e uma confirmação das informações que ele realmente fornece, através do efeito conjugado do hidrogênio dissolvido e das inclusões.

A seguir serão detalhados o procedimento e os objetivos específicos de cada teste realizado.

4.3.1 - Testes relativos a utilização do Gás-Tech II

Como já foi previamente relatado, este equipamento possibilita a obtenção de amostras solidificadas à vácuo, as quais refletem de forma amplificada a tendência do material à formação de porosidades de hidrogênio. Portanto vários fatores devem ser analisados para que se consiga repetibilidade e confiabilidade dos resultados.

Os resultados podem ser analisados de duas maneiras distintas, através da simples visualização da forma da amostra, e das porosidades resultantes na sua seção, e através da medição da sua densidade à vácuo, a qual permite que, com a utilização do procedimento de cálculo descrito na revisão bibliográfica, se obtenha um valor numérico global da porosidade da amostra. Obviamente o segundo tipo de análise oferece dados muito mais precisos, pois quando se analisa a seção da amostra existem dois fatores distintos, que são o tamanho e a quantidade das porosidades, sendo que, por muitas vezes, amostras com distribuições diferentes de porosidade apresentam densidades semelhantes. Por outro lado, para uma análise rápida e prática, para casos em que não é necessária uma precisão muito grande, a simples visualização é mais recomendada.

Como para os testes uma maior precisão se torna necessária, as amostras tiveram suas densidades à vácuo medidas em uma balança que compara os pesos de acordo com a eq.11 (Princípio de Arquimedes), a qual podia comportar amostras de qualquer geometria.

Todos os cálculos para obtenção da quantidade de porosidade das amostras foram efetuados de acordo com o procedimento descrito no teste Straube-Pfeiffer (item 3.2). Como o procedimento de cálculo fornece um dado numérico na forma de ml de $H_2/100$ g de Al, quando na realidade o efeito depende não apenas do hidrogênio mas também das inclusões, os resultados serão apresentados em termos da quantidade relativa de porosidade (em volume)

Em relação à amostragem também é importante que seja feito um pré-aquecimento do cadinho e que seja respeitado o tempo de solidificação da liga. Para isso normalmente o vácuo é mantido por seis a sete minutos para garantir a solidificação total de qualquer uma das ligas utilizadas.

Com a finalidade de averiguar a repetibilidade e precisão do método de controle foram realizadas as duas experiências descritas a seguir.

4.3.1.1 - Repetibilidade do método de controle:

Foram retiradas sete amostras seguidas de um banho de SAE 306, com o objetivo de avaliar se a dependência das inclusões não causaria um desvio muito grande em relação aos resultados obtidos para situações idênticas. As condições do teste foram as seguintes:

- Material: SAE 306
- T = 680°C
- U.R.A. = 83 %
- Carga = 200 Kg

Todos os resultados serão descritos no item 5.

4.3.1.2 - Efeito da forma de coleta em relação aos óxidos (escória)

Este teste teve como objetivo comprovar a influência da maneira como a amostra é coletada, utilizando para isso uma situação extrema, principalmente em relação à camada de óxido formada sobre o banho, para visualizar o efeito que as inclusões causariam nas medições.

Foram retiradas duas amostras seguidas do mesmo banho porém uma delas foi colhida com uma camada muito grande de escória sobrenadando o metal (normalmente a camada de óxido deve ser “quebrada” e deslocada com o próprio cadinho de amostragem para que seja coletado apenas o alumínio líquido). A outra amostra foi coletada corretamente.

- Material : SAE 305 c/ Sr
- T = 680 °C
- Carga : 200 Kg
- U.R.A. = 85 %.

4.3.2 - Tendência a absorção de hidrogênio em função da temperatura do banho

Este teste foi realizado com o objetivo de avaliar a influência da temperatura na quantidade de hidrogênio dissolvida no banho, relacionando os resultados com a cinética de absorção do mesmo, que é um fator decisivo na determinação das corretas condições de manuseio dos banhos, antes ou depois de qualquer tratamento.

Para a realização da experiência foi utilizado um forno de espera pertencente ao setor de fundição em coquilhas, carregado com aproximadamente 150 Kg da liga SAE 305, modificada por Sr.

O teste foi feito com esta liga porque, para se alcançar temperaturas acima dos 700°C no forno de espera, em um espaço de tempo razoável, é necessário tampá-lo, fato que se torna muito difícil para os fornos utilizados em injeção sob pressão (os quais utilizam a liga SAE 306) devido ao pequeno intervalo de tempo entre duas injeções.

O procedimento realizado foi o seguinte: foi estabilizado o banho da liga em questão à 640°C e mantido nestas condições por 20 minutos. A seguir foi elevada a temperatura do metal para 660°C e mantida por mais 20 minutos e assim sucessivamente até atingir 720°C. Ao fim de cada período de 20 minutos foi coletada uma amostra a qual foi solidificada à vácuo e analisada.

O controle da temperatura foi feito continuamente com o termopar de imersão digital.

- Material: SAE 305 c/ Sr
- Carga: 200 Kg
- Temperatura: 630 - 730 °C
- U.R.A.:

4.3.3 - Tendência à absorção de hidrogênio em função da U.R.A. (umidade relativa do ar)

Este teste foi realizado porque a U.R.A é a principal fonte de hidrogênio para o banho fundido e além disso, na cidade de Carlos Barbosa (a qual se localiza na região da Serra), onde está situada a Forjasul Materiais Elétricos, este fator atinge valores muito elevados, principalmente durante o inverno.

O objetivo global do teste é determinar se uma maior abundância de hidrogênio no ar, na forma de H₂O, irá influenciar na cinética da absorção do gás na liga de alumínio.

Para que fosse possível a obtenção de condições padronizadas, os testes foram realizados no próprio forno de fusão, utilizando cargas do mesmo material (lingotes de SAE 306) e temperatura constante.

A realização do teste posteriormente à fusão da carga virgem, no próprio forno de fusão, possibilitou também que as amostras fossem coletadas depois de um intervalo de tempo aproximadamente igual, pois este é o tempo necessário para que o metal funda e atinja a temperatura de vazamento. Além disso, pela própria utilização de uma temperatura mais elevada a comparação entre as diferentes condições atmosféricas fica, de certo modo, mais explícita devido à maior solubilidade de hidrogênio no alumínio.

As amostras foram retiradas ao longo de dois meses, dependendo das condições atmosféricas.

A U.R.A. foi medida através de um higrômetro, que compara termômetros de bulbos seco e úmido. É importante ressaltar que estas medições são apenas comparativas e de utilização restrita às condições da fábrica, pois, obviamente, as condições da atmosfera junto ao banho serão bem diferentes dos dados obtidos.

O higrômetro foi colocado a aproximadamente quatro metros do forno de indução.

4.3.4 - Testes relativos à desgaseificação

Nesta etapa do trabalho foi realizada uma comparação entre os métodos de desgaseificação, com ênfase na utilização do plug poroso e do FDU.

4.3.4.1 - Desgaseificação com plug poroso

Este teste foi realizado com a injeção de argônio através da lança e do plug poroso durante três períodos de cinco minutos, separados por intervalos de cinco a sete minutos para estabilização do banho e coleta das amostras.

A vazão utilizada foi de 15 litros/minuto, e foi determinada por dados bibliográficos e testes prévios comparativos.

Foram analisados os tempos e teores de porosidade atingidos, bem como efeitos na temperatura do banho e formação de escória.

Nestas experiências foi utilizado um segundo tipo de cadinho para amostragem, mas suas características são muito semelhantes ao cadinho arredondado utilizado anteriormente não havendo distorções nos resultados.

Material: SAE 306

Carga: 200 Kg

Temperatura: 670 °C

U.R.A. : 81 %

4.3.4.2 - Desgaseificação rotativa - FDU

Como o FDU deve ser programado, foram utilizadas as condições sugeridas pelo técnico da Foseco. Foram feitos dois testes os quais serão descritos a seguir.

1) Primeiramente a desgaseificação foi realizada em uma única etapa de três minutos, com uma vazão de argônio de 23 litros/minuto. A análise dos resultados foi feita da mesma maneira que para o teste com o plug poroso.

Material: SAE 306

Carga: 250 Kg.

Temperatura: 660 °C

U.R.A. : 81 %

2) Visando uma redução no tempo de tratamento, foi feita uma desgaseificação em duas etapas, sendo a primeira de um minuto e quarenta segundos e a segunda de três minutos. A vazão foi mantida a mesma.

Material: SAE 306

Carga: 250 Kg

Temperatura: 700 °C

U.R.A. : 81 %

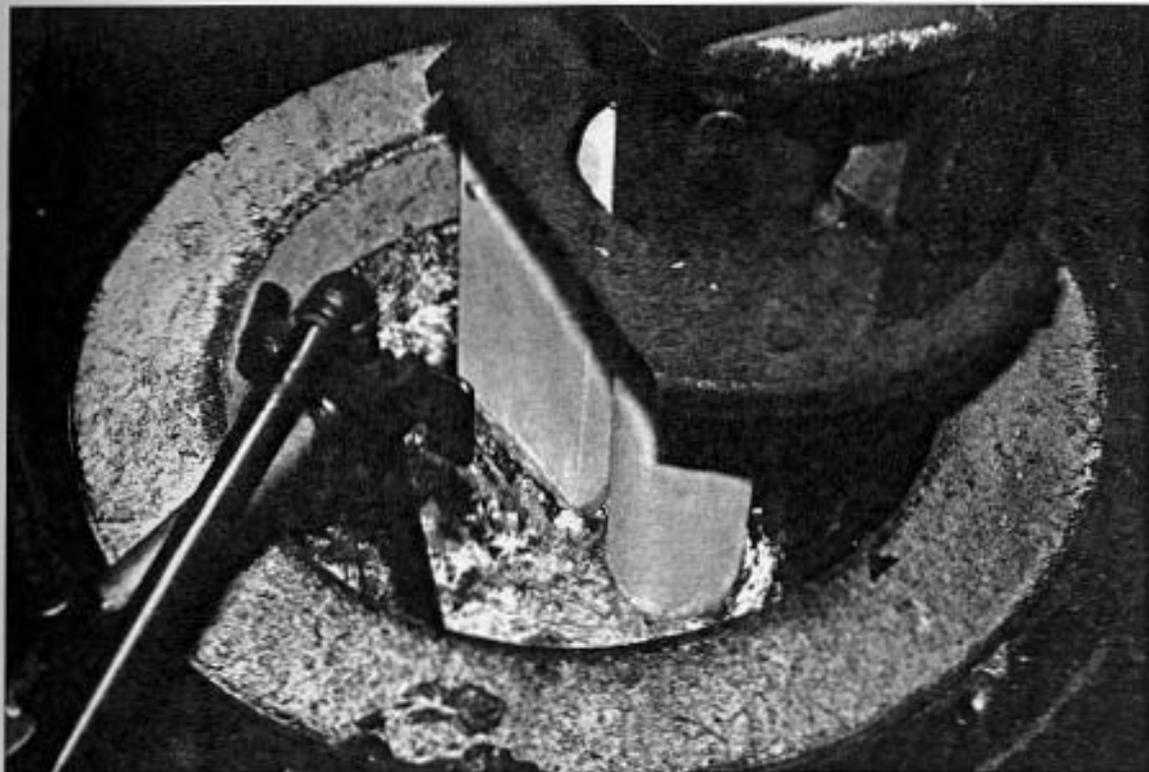


Fig. 17 - Vista superior do forno de espera com uma carga de alumínio sendo desgaseificada através do sistema FDU.

4.3.5 - Absorção de hidrogênio posteriormente ao tratamento de desgaseificação

A experiência descrita a seguir teve a intenção de avaliar a taxa de absorção do hidrogênio que sofrerá um banho previamente desgaseificado com o FDU. Para isso a temperatura foi mantida constante (660°C) e o manuseio do banho foi realizado normalmente.

Foram coletadas 3 amostras com intervalos de 30 minutos até o ponto em que foi necessário a adição de mais material ao banho, modificando as condições do mesmo.

5 - RESULTADOS

A seguir serão mostrados os resultados obtidos nos testes descritos no item anterior.

Os dados serão apresentados, principalmente, na forma de gráficos, os quais relacionam a porosidade com os parâmetros de interesse e em fotografias das seções dos corpos de prova solidificados à vácuo.

5.1 - Repetibilidade do método de controle - Gás - Tech II

A tabela abaixo mostra a densidade obtida à vácuo para cada amostra. Na página seguinte é mostrado o gráfico que relaciona o percentual de porosidade calculado em relação à densidade teórica da liga.

Amostra	Densidade à vácuo (g/cm ³)
1	2,41
2	2,50
3	2,43
4	2,46
5	2,467
6	2,47
7	2,47

Tabela 4 - Resultados do teste relativo à repetibilidade do método de controle.

REPETIBILIDADE DO MÉTODO DE CONTROLE GÁS TECH II

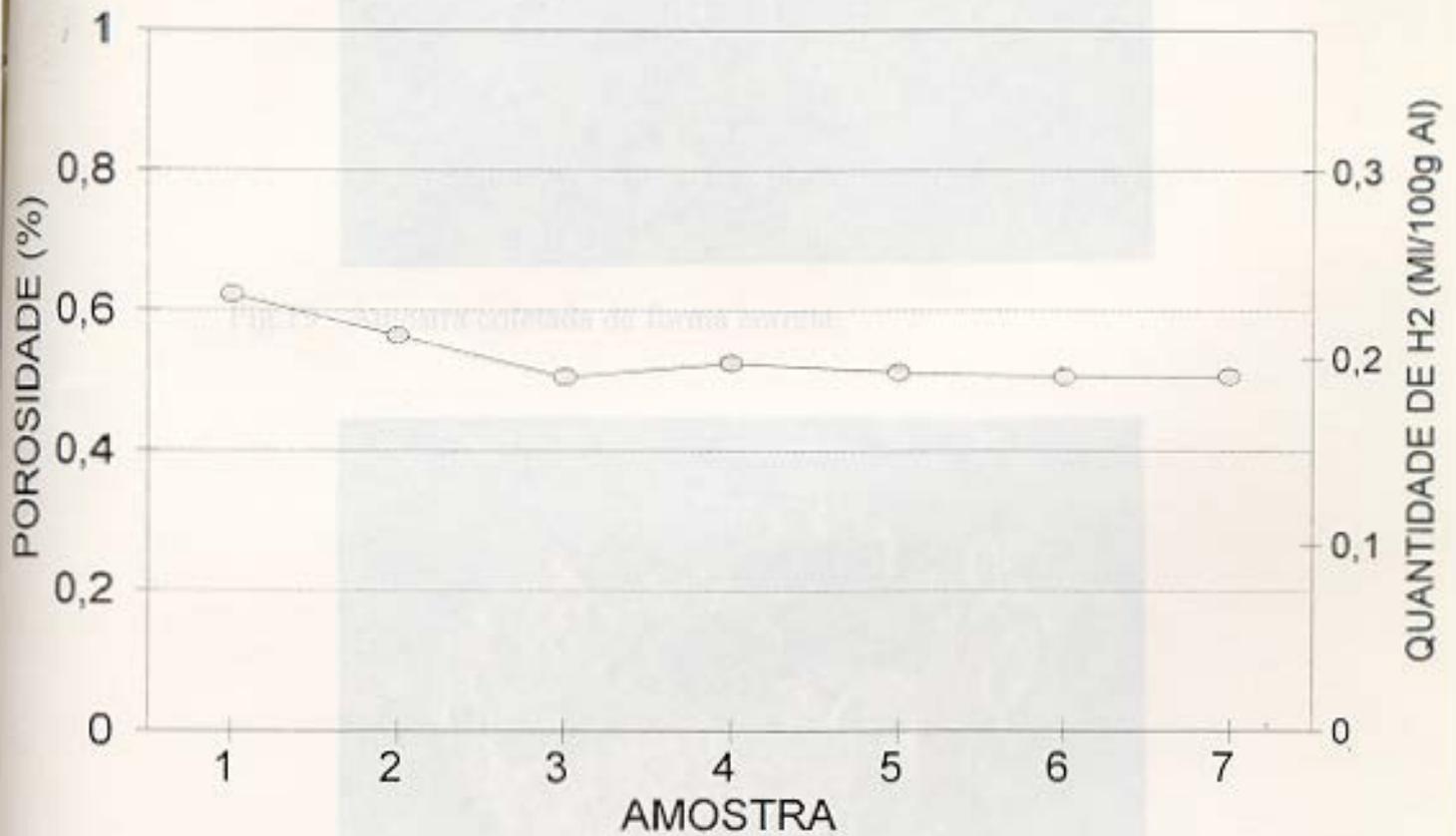


Fig.20 - Amostra colada com camada de oxidação (óxido) sobre o alumínio líquido.

Fig.18 - Gráfico demonstrativo dos resultados obtidos no teste relativo à repetibilidade do método de controle.

5.2 - Efeito da forma de coleta em relação aos óxidos

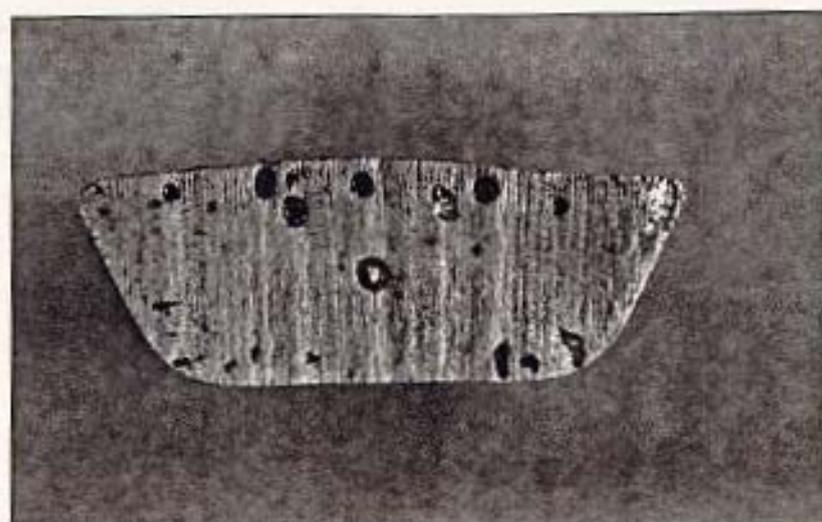


Fig.19 - Amostra coletada de forma correta.

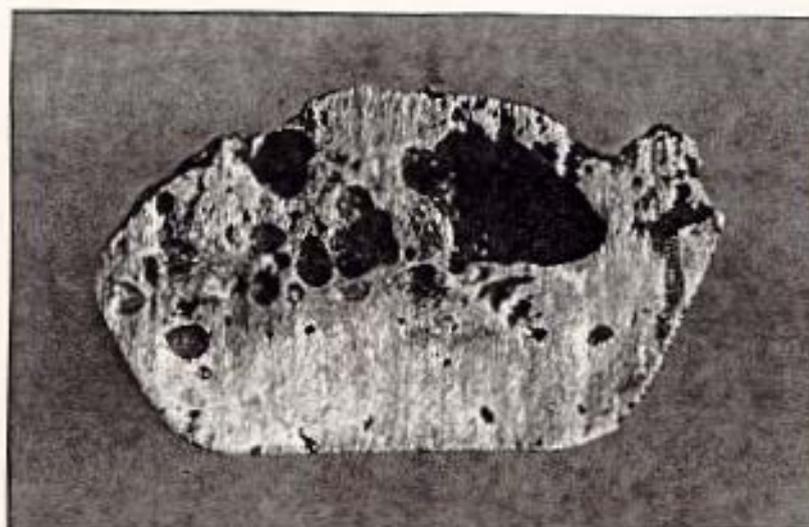


Fig.20 - Amostra coletada com excesso de escória (óxidos) sobre o alumínio líquido.

5.3 - Tendência à absorção de hidrogênio em função da temperatura do banho

A tabela abaixo mostra os valores de densidade à vácuo que foram obtidos neste teste.

Temperatura (°C)	Densidade à vácuo (g/cm ³)
640	2,418
685	2,393
705	2,35
730	2,285

Tabela 5 - Resultados do teste porosidade × temperatura do banho.

POROSIDADE × TEMPERATURA

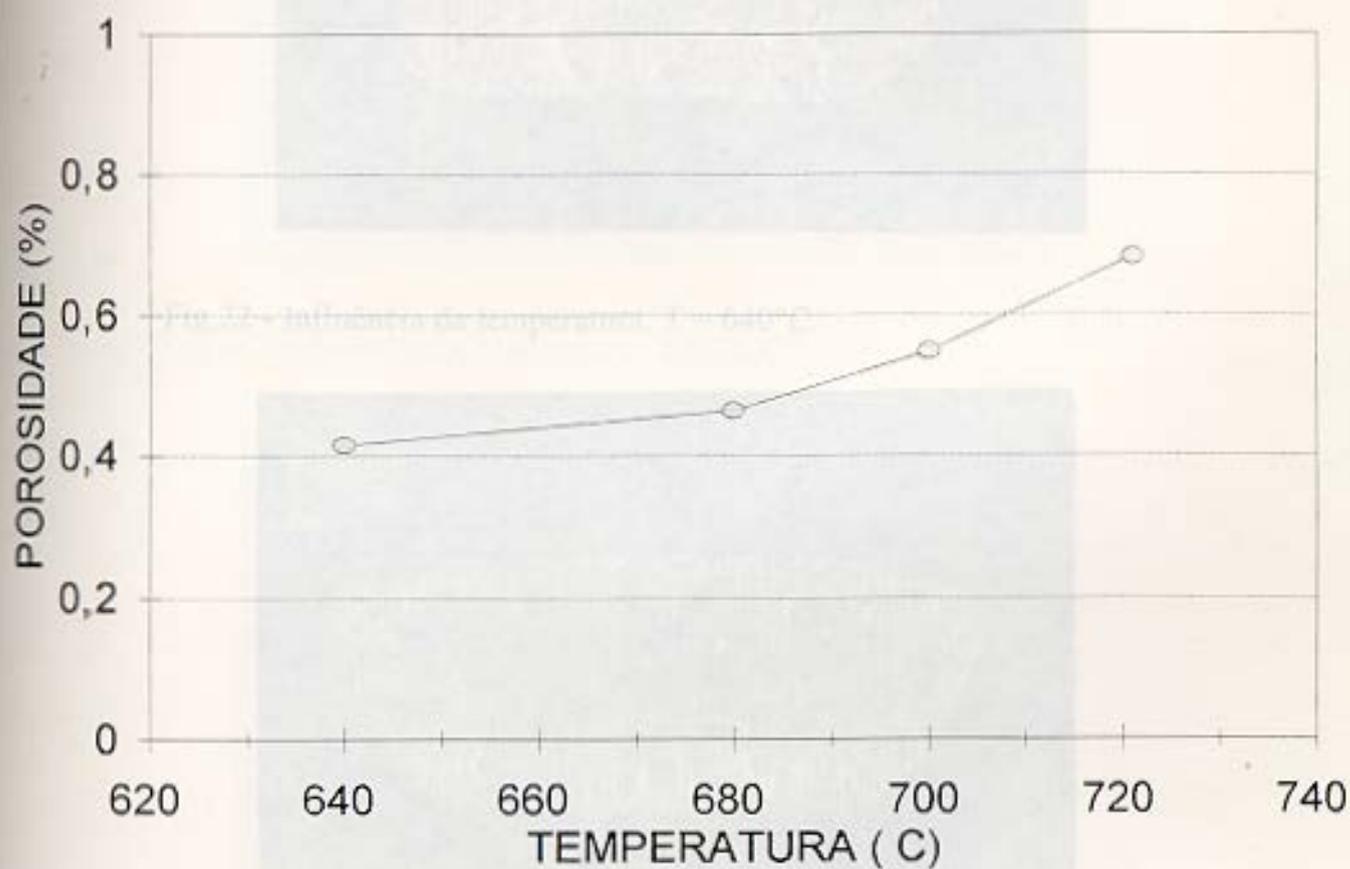


Fig.21 - Influência da temperatura. T = 685°C

Fig.21 - Gráfico demonstrativo do resultado obtido no teste relativo à absorção de hidrogênio em função da temperatura do banho. .

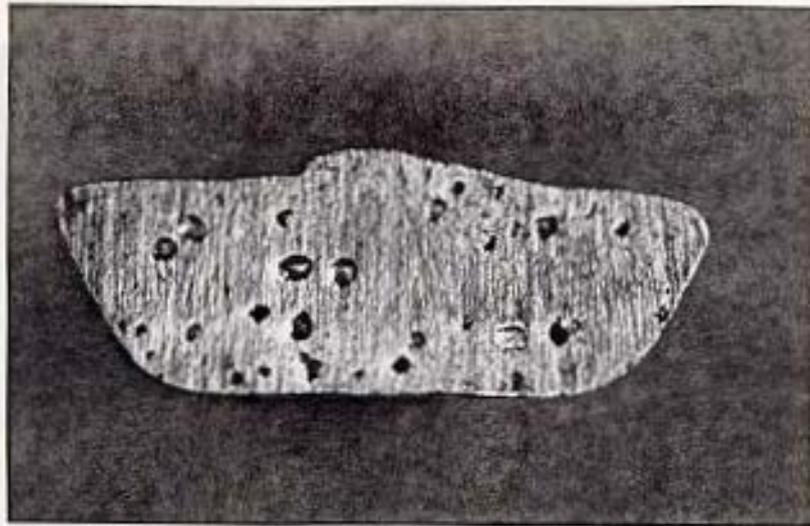


Fig.22 - Influência da temperatura. $T = 640^{\circ}\text{C}$.

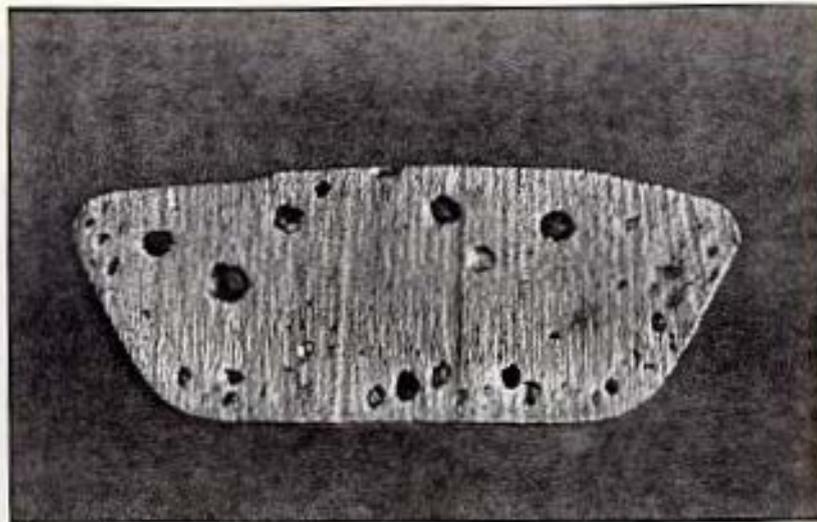


Fig.23 - Influência da temperatura. $T = 685^{\circ}\text{C}$.

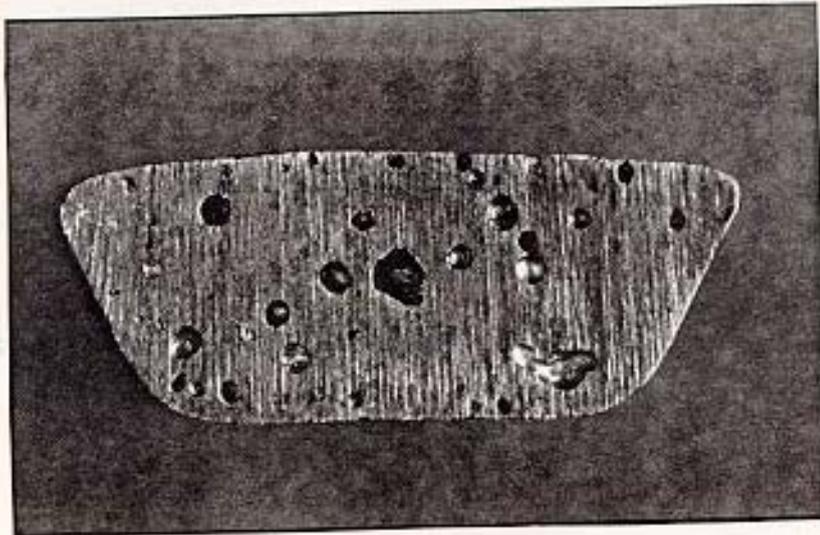


Fig.24 - Influência da temperatura. $T = 705^{\circ}\text{C}$.

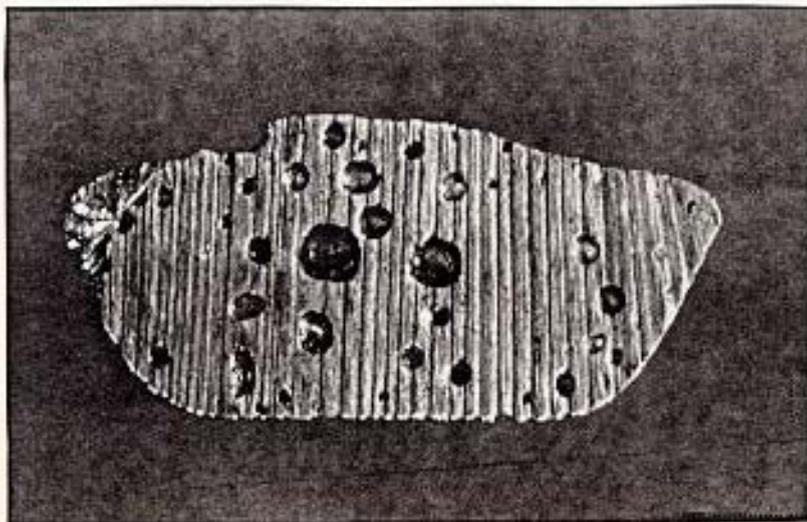


Fig.25- Influência da temperatura. $T = 725^{\circ}\text{C}$.

5.4 - Tendência a absorção de hidrogênio em função da U.R.A.

A tabela abaixo mostra os resultados obtidos em termos de densidade à vácuo.

U.R.A. (%)	Densidade à vácuo (g/cm ³)
54	2,496
65	2,47
73	2,404
87	2,361

Tabela 6 - Resultado do teste porosidade × URA.

POROSIDADE × U.R.A.

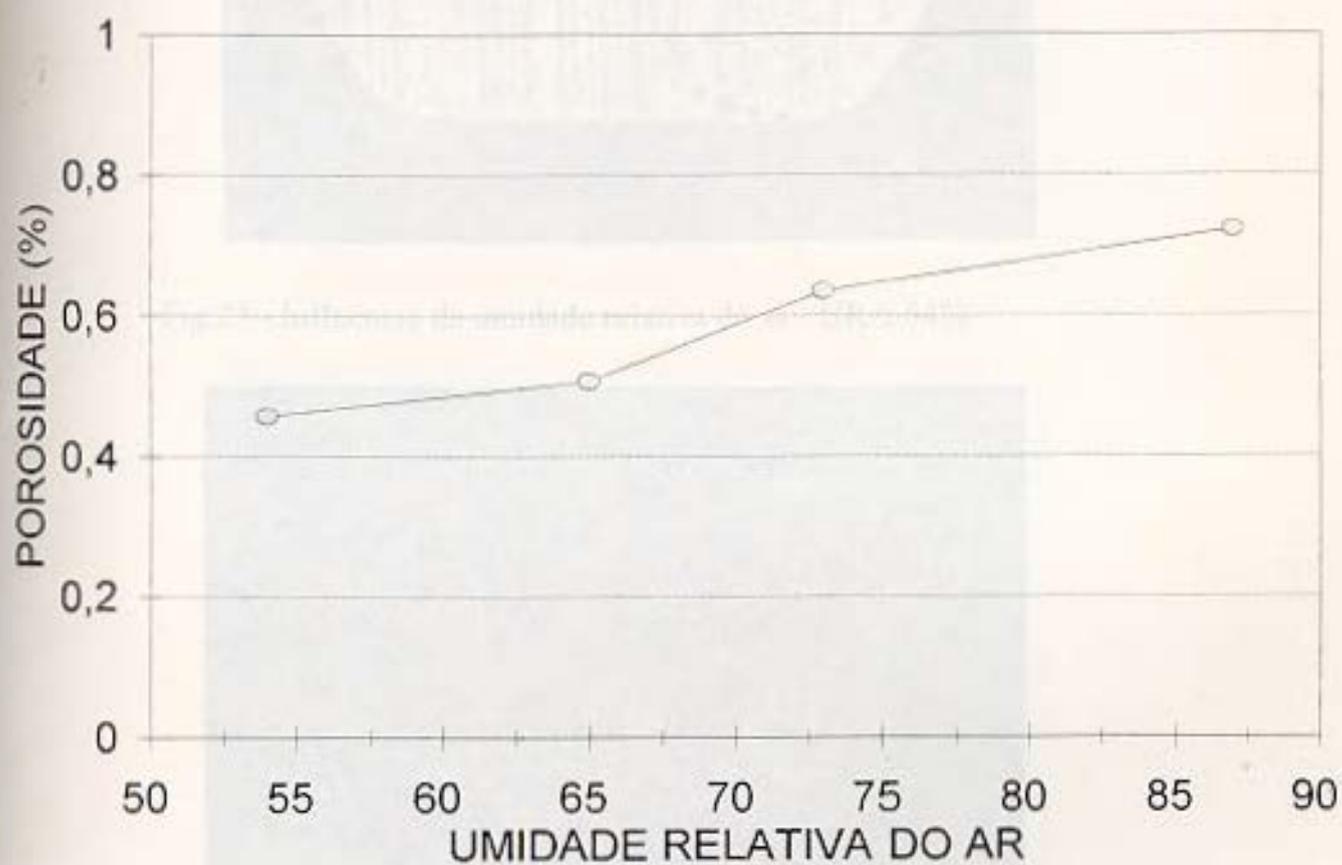


Fig.26 - Influência da umidade relativa do ar U.R.A. = 100%

Fig.26 - Gráfico demonstrativo dos resultados obtidos no teste relativo à absorção de hidrogênio em função da U.R.A..

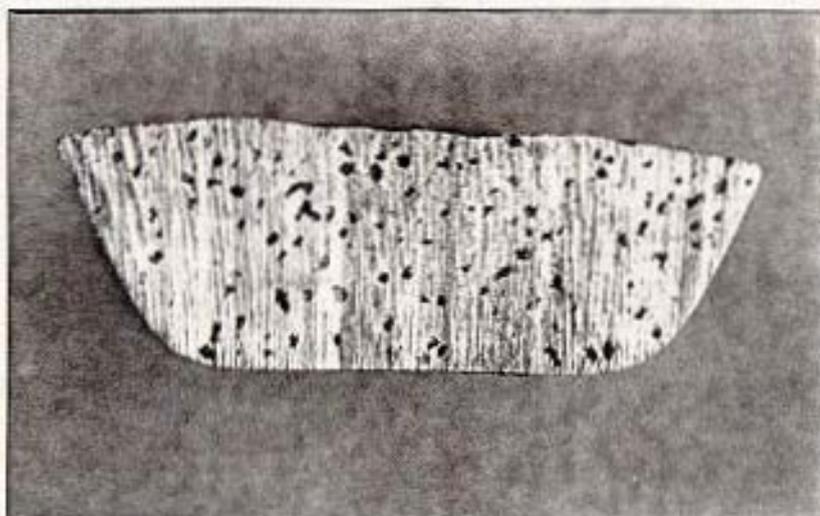


Fig.29 - Influência da umidade relativa do ar. URA = 73%.

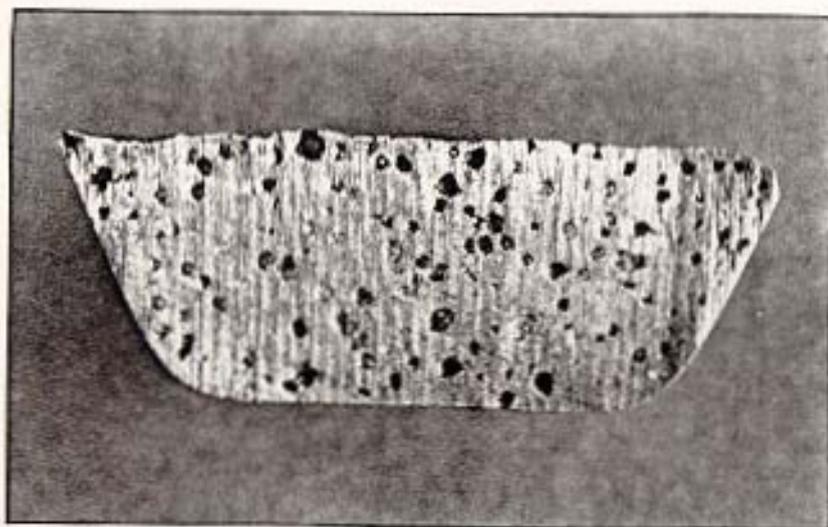


Fig.30 - Influência da umidade relativa do ar. URA = 87%.

5.5 - Desgaseificação com plug poroso

A tabela abaixo relaciona o tempo de desgaseificação com plug poroso com a densidade à vácuo atingida.

Amostra	Tempo de desgaseificação (min)	Densidade à vácuo (g/cm ³)
1	0 (teor original)	2,46
2	5	2,69
3	10	2,73
4	15	2,73

Tabela 7 - Resultado do teste de desgaseificação com plug poroso.

Quantidade de escória formada: 1,3 Kg para 200 Kg de metal.

Desgaseificação c/ plug poroso (Ar)

Vazão : 14 litros/minuto

Temperatura : 670 Celsius

Material : SAE 306 (250 Kg)

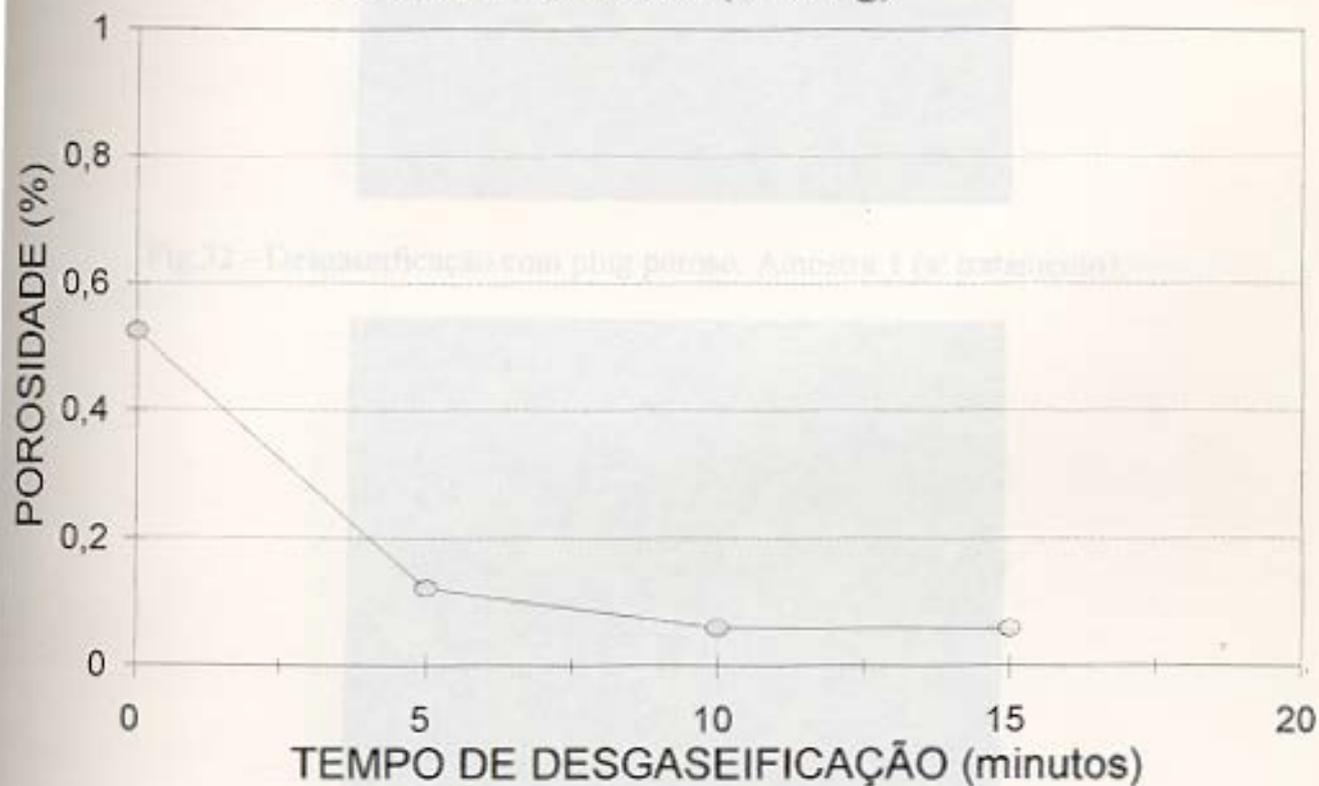


Fig.31 - Gráfico demonstrativo dos resultados obtidos no teste relativo à desgaseificação com plug poroso.

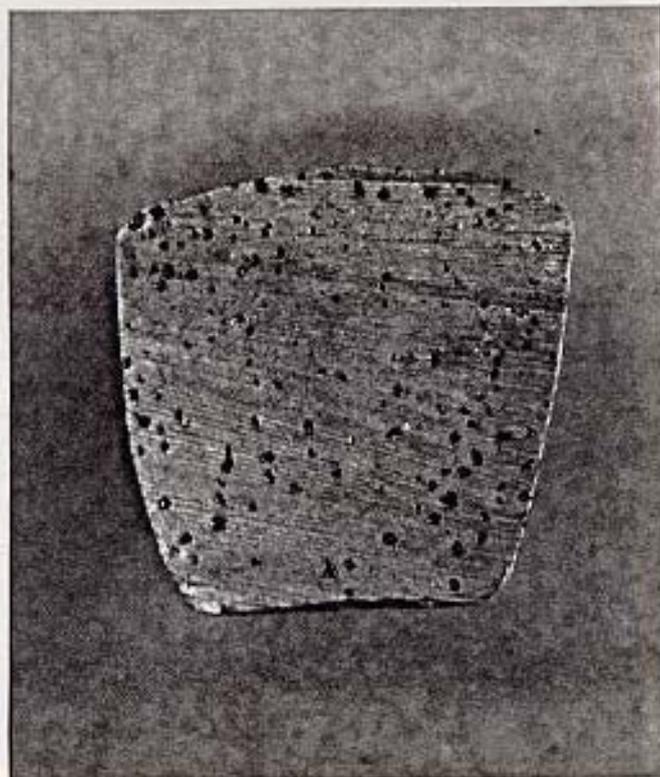


Fig.32 - Desgaseificação com plug poroso. Amostra 1 (s/ tratamento).

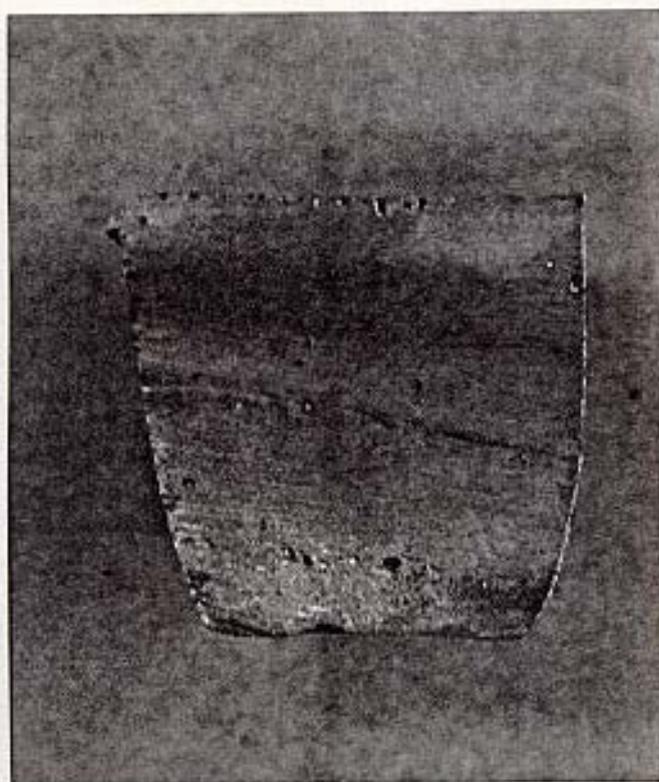


Fig.33 - Desgaseificação com plug poroso. Amostra 2 (5 minutos de tratamento)

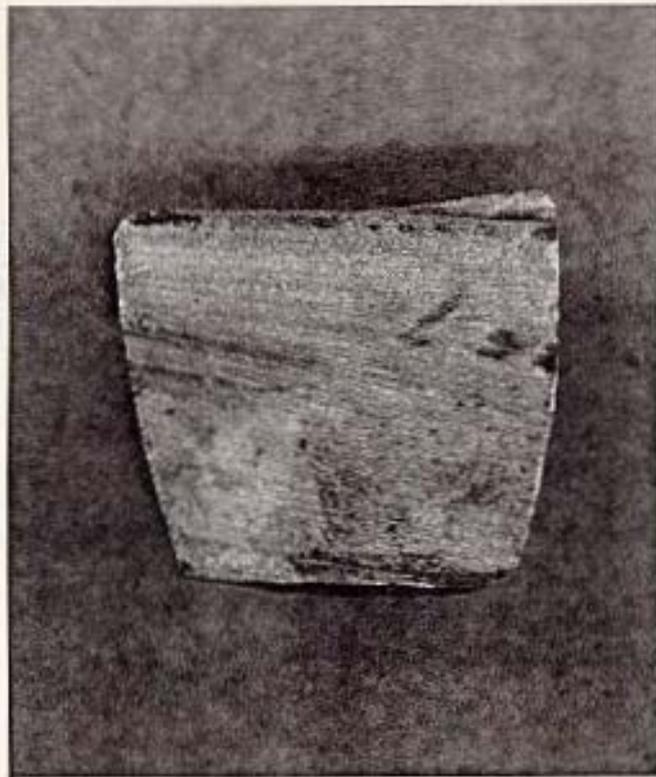


Fig.34 - Desgaseificação com plug poroso. Amostra 3 (10 minutos de tratamento)

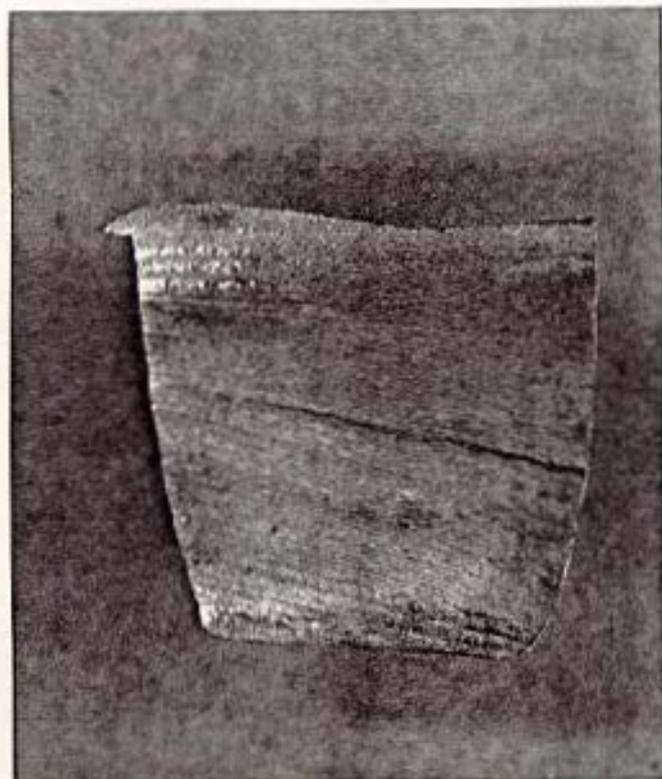


Fig.35 - Desgaseificação com plug poroso. Amostra 4 (15 minutos de tratamento)

5.6 - Desgaseificação rotativa - FDU

5.6.1 - FDU - Teste 1

Amostra	Tempo de desgaseificação (min)	Densidade à vácuo (g/cm^3)
1	0 (s/ tratamento)	2,47
2	3	2,69

Tabela 8 - Resultado do teste 1 de desgaseificação rotativa.

Quantidade de escória formada : 0,740 Kg p/ 250 Kg.

Desgaseificação 1- c/ FDU (Ar)

Vazão : 22 litros/minuto

Temperatura : 670 Celsius

Material : SAE 306 (250 Kg)

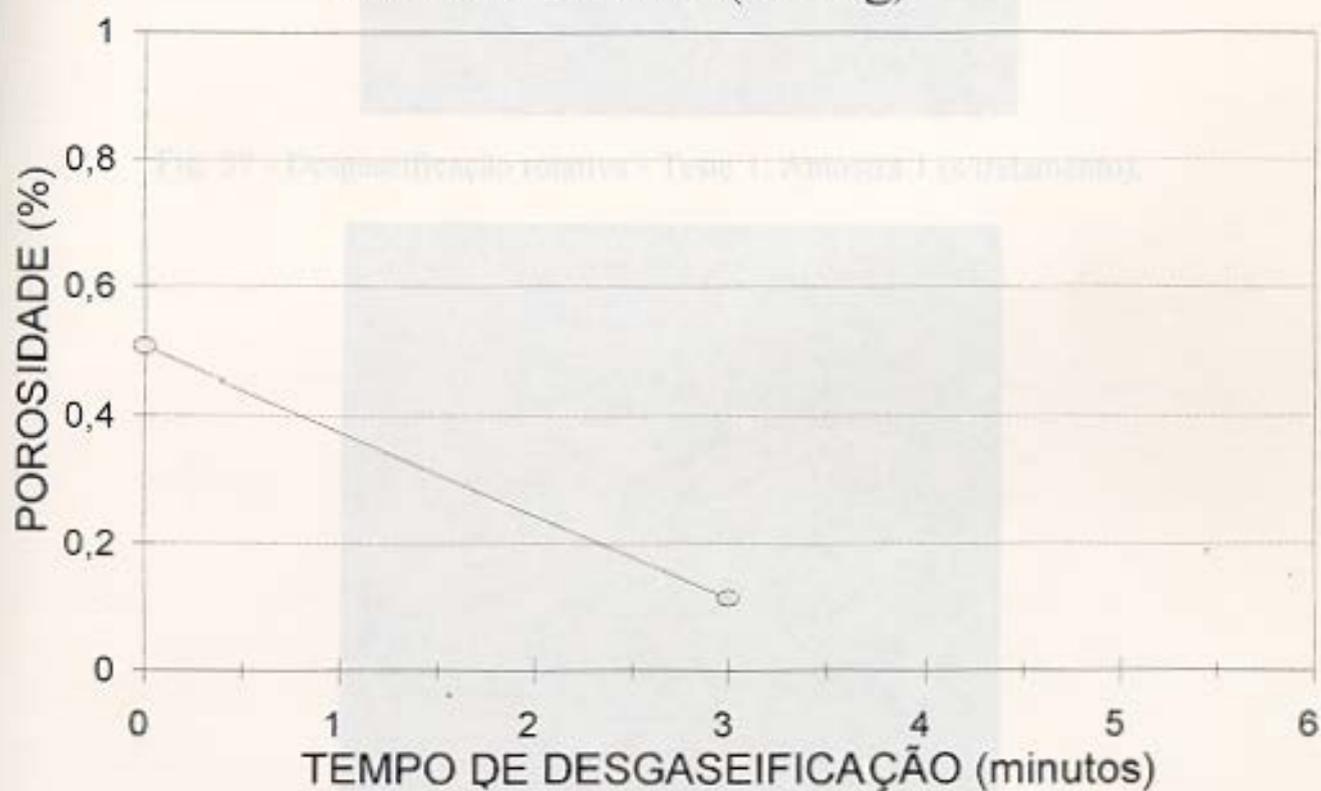


Fig.36 - Gráfico relativo aos resultados obtidos para o teste 1 realizado com o FDU.

Amostra	Tempo
1	0 min
2	3 min
3	15 min

Tabela 9 - Resultados

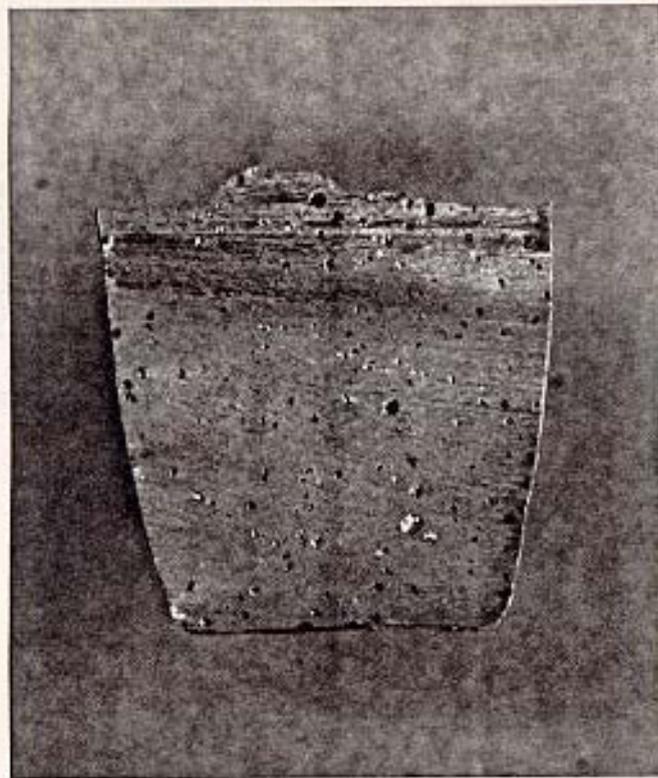


Fig. 37 - Desgaseificação rotativa - Teste 1. Amostra 1 (s/tratamento).

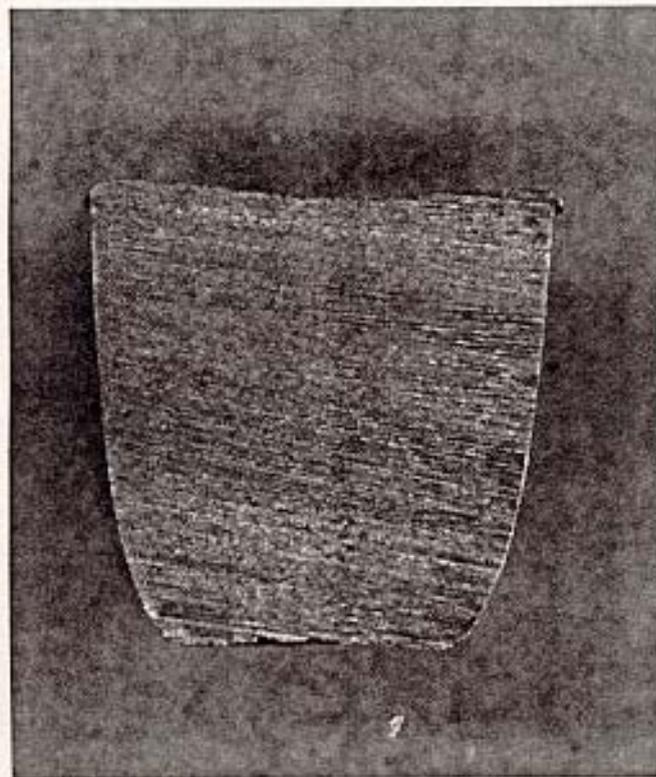


Fig.38 - Desgaseificação rotativa - Teste 1. Amostra 2 (3 minutos de tratamento)

5.6.2 - FDU - Teste 2

Amostra	Tempo de degaseificação (min)	Densidade à vácuo (g/cm ³)
1	0 (s/tratamento)	2,36
2	1'40	2,55
3	4'40	2,72

Tabela 9 - Resultado do teste 2 de degaseificação rotativa.

Desgaseificação 2 - c/ FDU (Ar)

Vazão : 22 litros/minuto

Temperatura : 700 Celsius

Material : SAE 306 (250 Kg)

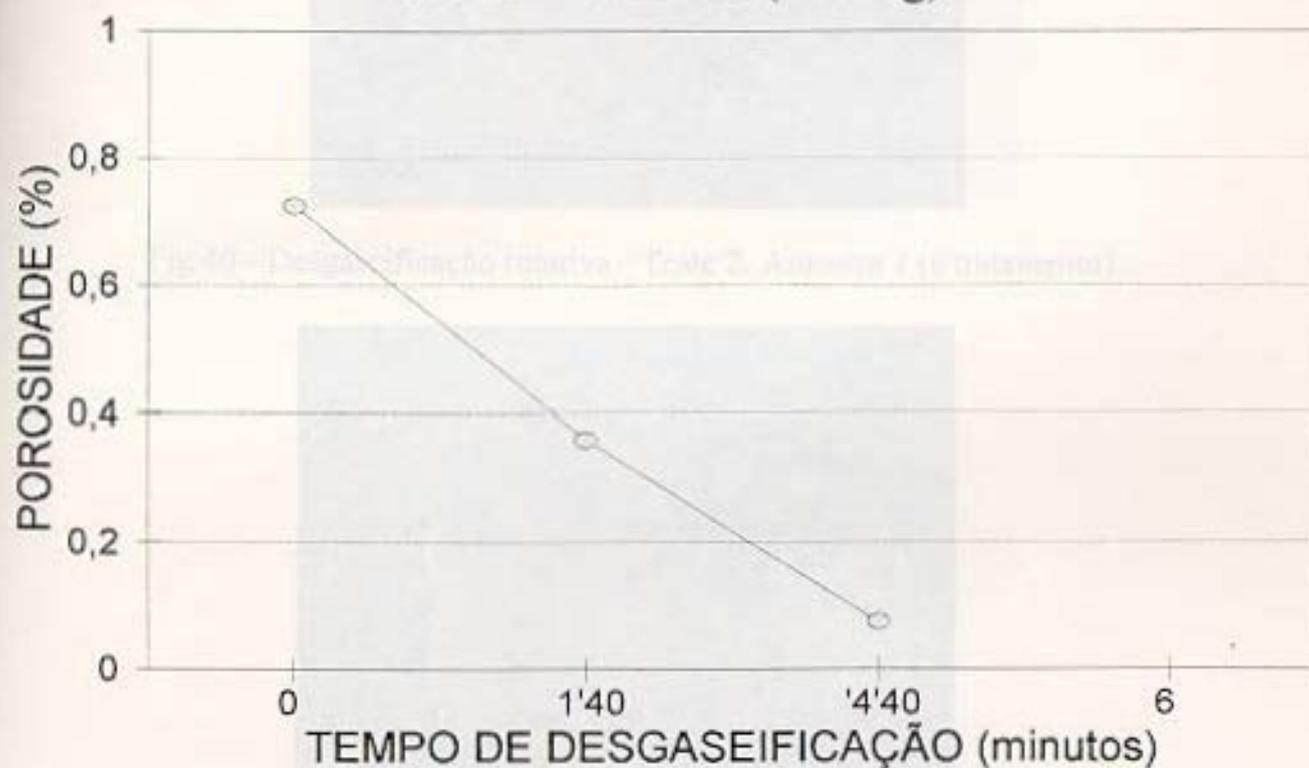


Fig.39 - Gráfico relativo aos resultados obtidos para o teste 2 realizado com o FDU.

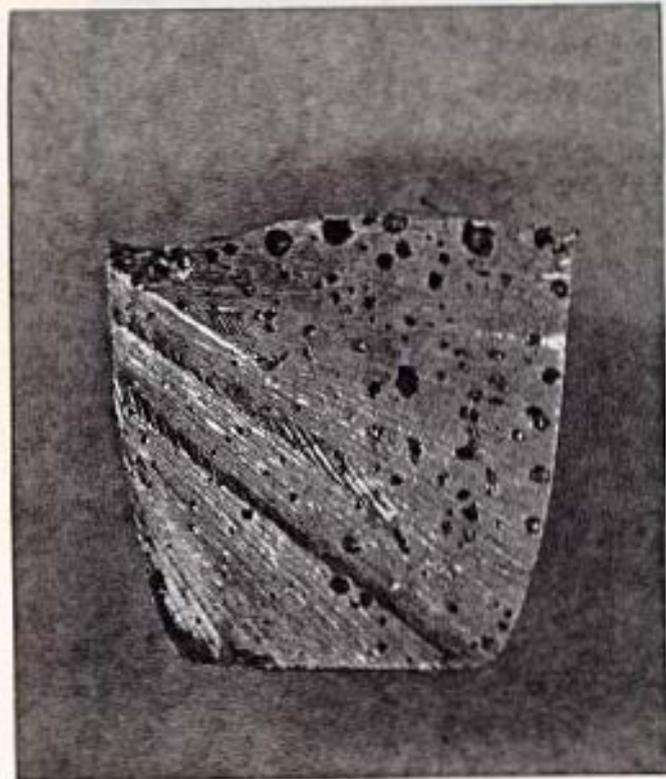


Fig.40 - Desgaseificação rotativa - Teste 2, Amostra 1 (s/tratamento).

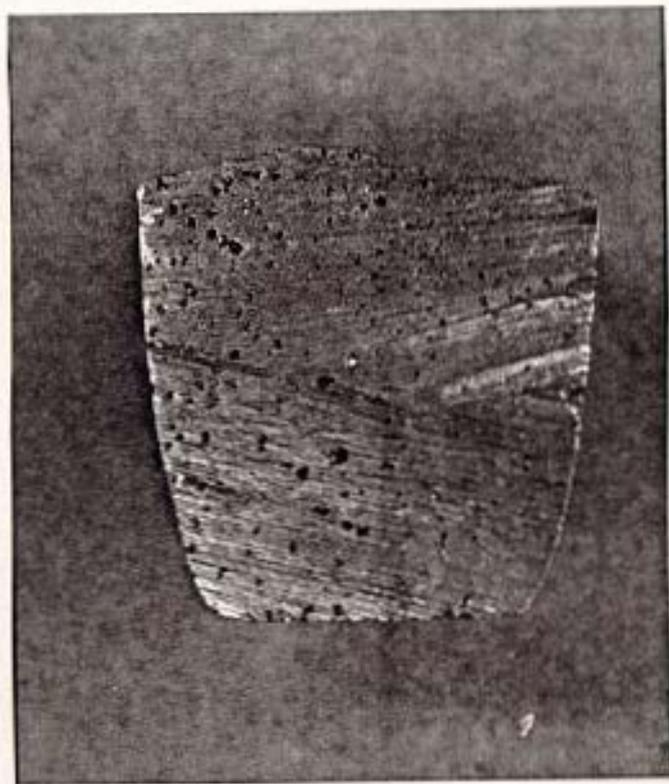


Fig.41 - Desgaseificação rotativa - Teste 2, Amostra 2 (1 minuto e quarenta segundos de tratamento).

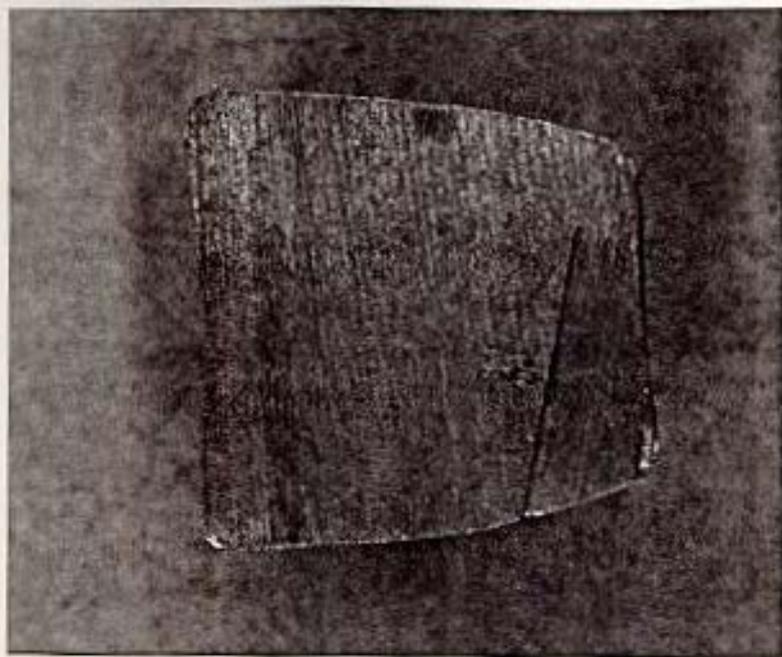


Fig.42 - Desgaseificação rotativa - Teste 2. Amostra 3 (4 minutos e quarenta segundos de tratamento).

5.7 - Absorção de hidrogênio após o tratamento de degaseificação

A tabela abaixo mostra os valores das densidades à vácuo encontradas para esse experimento:

Amostra	Tempo (minutos)	Densidade à vácuo
1	após a degaseificação	2,66
2	30	2,72
3	60	2,715
4	90	2,710

ABSORÇÃO DE H₂ APÓS A DESGASEIFICAÇÃO

T = 660 C

MATERIAL : SAE306

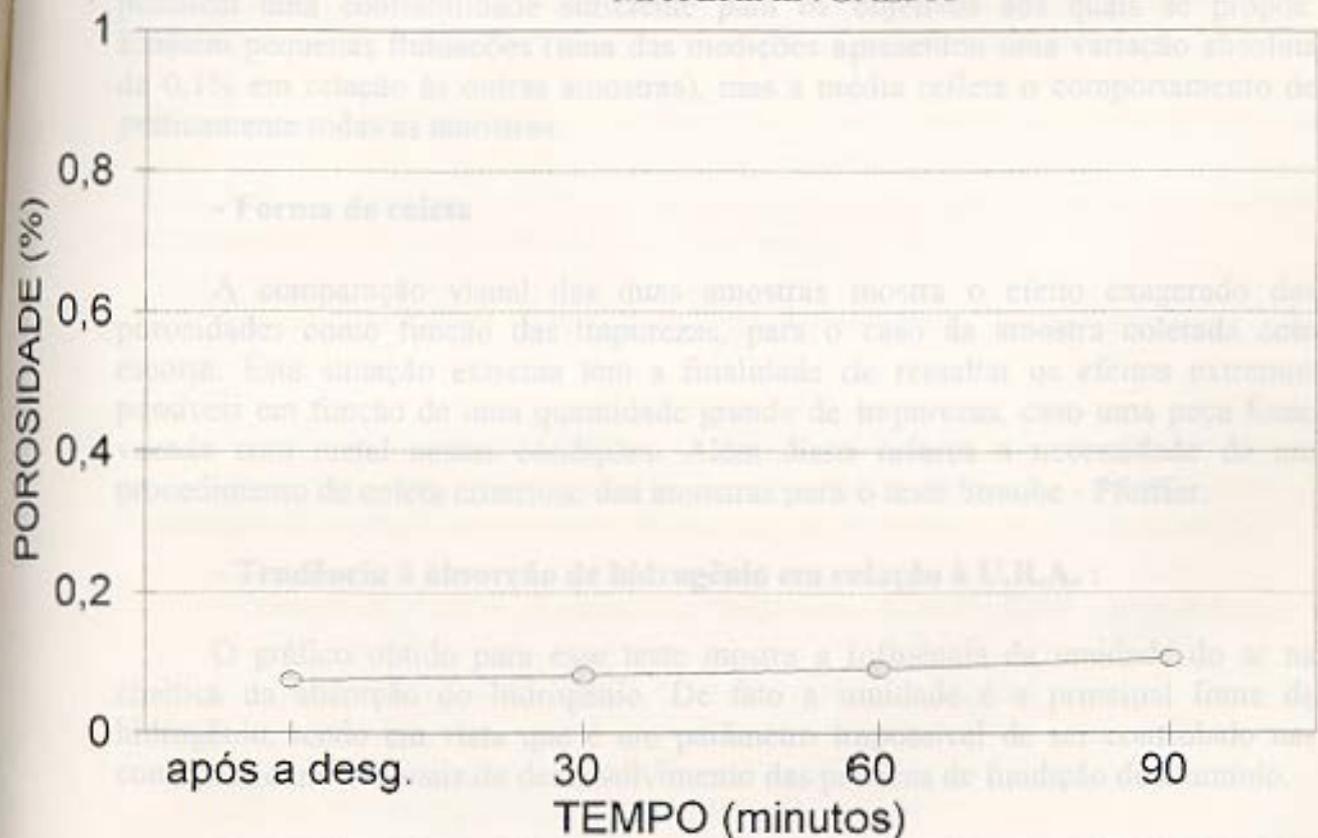


Fig. 43 - Gráfico relativo aos resultados obtidos em relação à absorção de hidrogênio posteriormente ao tratamento de desgaseificação.

6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste item será feita uma breve interpretação dos resultados obtidos nos testes. Esta análise será realizada em duas etapas, a primeira relativa aos testes preliminares e a segunda em relação aos testes dos métodos de desgaseificação.

Testes preliminares:

- Repetibilidade do método de controle

É possível averiguar que as informações fornecidas pelo ensaio de solidificação à vácuo (plotadas no gráfico da fig.18), apesar de serem qualitativas, possuem uma confiabilidade suficiente para os objetivos aos quais se propõe. Existem pequenas flutuações (uma das medições apresentou uma variação absoluta de 0,1% em relação às outras amostras), mas a média reflete o comportamento de praticamente todas as amostras.

- Forma de coleta

A comparação visual das duas amostras mostra o efeito exagerado das porosidades como função das impurezas, para o caso da amostra coletada com escória. Esta situação extrema tem a finalidade de ressaltar os efeitos extremos possíveis em função de uma quantidade grande de impurezas, caso uma peça fosse vazada com metal nestas condições. Além disso reforça a necessidade de um procedimento de coleta criterioso das amostras para o teste Straube - Pfeiffer.

- Tendência à absorção de hidrogênio em relação à U.R.A. :

O gráfico obtido para esse teste mostra a influência da umidade do ar na cinética da absorção do hidrogênio. De fato a umidade é a principal fonte de hidrogênio, tendo em vista que é um parâmetro impossível de ser controlado nas condições convencionais de desenvolvimento das práticas de fundição de alumínio.

Apesar do teste ter sido realizado nas condições do forno de fusão (pelos motivos descritos anteriormente), o efeito do fator U.R.A. vai ser realmente importante em relação ao metal depositado no forno de espera que já tenha sofrido algum procedimento de desgaseificação, pois vai determinar, conjuntamente com as operações de manuseio do banho, o tempo que será gasto para que o metal novamente atinja a condição de equilíbrio de hidrogênio dissolvido. Da mesma forma é possível prever que existirá uma maior absorção de gás no momento do vazamento das peças, devido à turbulência criada nessa operação.

- Tendência à absorção de hidrogênio em função da temperatura:

Analisando o gráfico resultante do nível de porosidade das amostras foi possível verificar :

- através da crescente inclinação da curva, que, sendo o equilíbrio progressivamente deslocado, a solubilidade do hidrogênio no alumínio realmente apresenta um comportamento exponencial.

- através da taxa sucessivamente crescente de absorção do hidrogênio, comparada com dados prévios relativos aos mesmos parâmetros para temperaturas inferiores (teste 4.3.5), que o aumento da temperatura favorece diretamente a cinética do fenômeno, atuando também no deslocamento e distribuição do gás no banho

É preciso levar em conta a diferença, em termos absolutos, que existe entre as ligas SAE305 (c/ Sr) e SAE 306, pois devido, em grande parte, ao próprio elemento modificador, a primeira apresenta uma absorção mais rápida e uma solubilidade levemente superior (em função do teor do mesmo).

- Absorção de hidrogênio posteriormente ao tratamento de degaseificação:

O resultado deste teste (descrito no gráfico da fig.43), comprova o fato de que para baixas temperaturas a cinética da absorção é reduzida, possibilitando a manutenção das condições do banho resultantes do tratamento de degaseificação.

- Comparação entre os processos de degaseificação: FDU e plug poroso:

Os testes realizados possibilitaram a avaliação dos seguintes fatores:

- tempo de degaseificação
- eficiência da degaseificação
- quantidade de escória formada
- vazão de gás inerte necessária
- aspectos operacionais
- custos

A primeira e mais importante constatação foi que ambos os métodos apresentaram uma eficiência muito grande, chegando a níveis de porosidade reduzidos, sendo que o FDU necessitou um tempo de três minutos (Fig.36) para o tratamento do metal e o plug poroso necessitou de cinco minutos, obtendo um

resultado semelhante (Fig.31). O teste 2 (Fig.39) relativo ao FDU, mostrou que com uma redução no tempo de tratamento o mesmo não atinge resultados satisfatórios.

Em relação à quantidade de escória formada o FDU gerou cerca de 0,3% (750g de escória para uma carga de 250Kg) contra 0,65% (1,3Kg de escória para uma carga de 200Kg) gerada pelo processo do plug poroso.

O tratamento com o FDU utiliza uma vazão de 22 l/min de Ar, totalizando, para três minutos, 66 litros de gás inerte gasto por tratamento. Já o plug poroso utiliza uma vazão de 15 l/min durante cinco minutos, resultando em 75 litros de gás utilizados em cada tratamento.

Do ponto de vista dos aspectos operacionais, o FDU apresenta muitas dificuldades pois, é de difícil transporte, precisando ser empurrado, e o ciclo das operações e duração das mesmas precisam ser pré-programados tornando assim necessária uma padronização das dimensões principais dos fornos de espera, principalmente a altura do cadinho.

Outro fator muito importante é o custo de cada um dos métodos. O equipamento FDU significa um investimento em torno dos R\$ 25.000,00, valor ao qual ainda deve ser acrescido o custo dos consumíveis (rotor, eixo e placas), o qual é aproximadamente R\$1.200,00 para o kit completo.

O alto custo de investimento inicial representado pelo FDU representa uma vantagem para o sistema de lança e plug poroso, o qual tem um custo de apenas R\$ 300,00 (consumíveis).

Para os dois sistemas deve ser acrescido o custo do argônio, que é de aproximadamente R\$ 300,00 cada tubo de 3 m³.

7 - CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos pode-se chegar às seguintes conclusões:

- o método de controle utilizado se mostrou muito eficiente, fato que pode ser constatado pela regularidade dos resultados em todos os testes. A visualização da seção das amostras pode ser utilizada como uma maneira prática e rápida de averguação do estado do banho em relação aos fatores estudados neste trabalho. Além disso o método de solidificação à vácuo possui um custo operacional praticamente nulo.

- os testes preliminares, relativos à variação da temperatura do material nos fornos de espera e à U.R.A., comprovaram a necessidade de procedimentos cuidadosos no manuseio e manutenção do banho, principalmente quando o mesmo sofreu um tratamento de desgaseificação. Esta necessidade se deve, principalmente, aos fatores cinéticos ligados à absorção do hidrogênio, pois foi comprovado que o tempo necessário para que seja atingido o equilíbrio da solubilidade do gás nas ligas de alumínio dependerá diretamente destes fatores. Em outras palavras, estes fatores determinam o tempo que um banho desgaseificado (fora do equilíbrio) levará para atingir novamente os níveis de gás considerados prejudiciais à qualidade das peças. Este será o tempo limite entre os tratamento de desgaseificação.

- como ambos os métodos de desgaseificação testados conseguiram se mostrar eficientes na sua função, pode-se passar a avaliar diretamente os outros fatores envolvidos na sua utilização, que são os aspectos operacionais e custos. Sendo assim, a partir da comparação feita no item 6, conclui-se que o desgaseificador rotativo, apesar de apresentar um comportamento mais previsível e confiável, devido ao próprio princípio de operação, apresenta uma relação desfavorável entre custos e problemas operacionais. É importante mencionar que o equipamento testado neste trabalho já está ultrapassado por versões mais modernas fabricadas pela mesma empresa. Esses aperfeiçoamentos incluem inclusive um equipamento para movimentação do sistema.

8 - BIBLIOGRAFIA

- 1 - Metals Handbook, ASM International, volume 15, Casting, 1992.
- 2 - Yoshioka, C. H. e Oliveira, F. Sais e desgaseificação das ligas de alumínio. Seminário, Cordoba, setembro de 1993. Foseco.
- 3 - Bruner, R.W. Fractures - Positive Identification of Internal Defects in Aluminum Castings. What the AFS Literature says about porosity in aluminum castings.
- 4 - Backmun, E.V. Aluminum Castings Alloys - Effect of Composition and Foundry Practices on Properties and Quality. What the AFS literature says
- 5 - Maniglia, M.M. Desgaseificação e filtração do alumínio. Metalurgia - ABM, Vol.44, número 363, fevereiro 1988.
- 6 - Martins, M.M. Fluxação de ligas de alumínio. Metalurgia - ABM, Vol.44, número 363, fevereiro de 1988.
- 7 - Bridi, R., Traudi, E.A. e Yoshioka, C.H. Novo método para o controle do processo de fundição do alumínio. Fundição e Serviços - Agosto/setembro 1992.
- 8 - Fuoco, R. Curso de Fundição de Ligas de Alumínio. ABAL.