

FLUIDEZ DE AÇOS E FERROS FUNDIDOS:  
EFEITO DA COMPOSIÇÃO, TEMPERATURA DE VAZAMENTO E DESOXIDAÇÃO (1)

Jorge Finardi (2)

Luis Carlos Guedes (3)

RESUMO

São discutidos inicialmente o conceito de fluidez e os ensaios aplicados na sua determinação.

A fluidez de aços e ferros fundidos varia em função da composição, temperatura de vazamento e sequência de desoxidação. Dentro da faixa de análise permissível para um dado aço ou ferro fundido, a variação de composição tem pouca influência sobre a fluidez.

A elevação da temperatura de vazamento aumenta sensivelmente a fluidez, no entanto, do ponto de vista de propriedades da peça fundida há interesse em utilizar a menor temperatura de vazamento possível.

A sequência de desoxidação determina a quantidade e morfologia de inclusões. As inclusões sólidas reduzem a fluidez proporcionalmente a sua quantidade. É o caso de inclusões de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  e óxidos de metais de terras raras. As inclusões líquidas não perturbam a fluidez.

São discutidas as combinações de desoxidantes que fornecem aço com boa fluidez.

- 
- (1) - Contribuição técnica apresentada no Seminário Sobre Tecnologia em Fundição, ABM/COFUN, São Paulo, Setembro de 1982.
  - (2) - Engenheiro metalurgista e doutor. Diretor Técnico Comercial da Bozel Mineração e Ferroligas, Professor Ass.De. da Escola Politécnica da USP e Professor Titular da Es.Eng. Univ.Mackenzie.
  - (3) - Engenheiro metalurgista do Agrupamento de Fundição do Inst. de Pesq. Tecnológicas, Est. S.P.m professor assistente da Esc. Eng. Univ. Mackenzie.

## 1. CONCEITO DE FLUIDEZ E SUA IMPORTÂNCIA

A fluidez é um termo que tem sido utilizado durante longo tempo, apesar de não haver ainda uma definição aceita dessa denominação. Sob o ponto de vista de fundição a fluidez é capacidade que um metal possui de fluir livremente num molde e fornecer uma perfeita reprodução de detalhes (1).

Do ponto de vista físico a fluidez, que é o inverso da viscosidade, é uma propriedade fundamental de um líquido, enquanto que a capacidade de um metal preencher os detalhes de um molde depende de uma série de fatores, a fluidez sendo apenas um deles. Por essa razão diferentes autores tem utilizado termos próprios para definir essa capacidade dos metais líquidos (2). Os autores franceses tem adotado o termo "coulabilité" (escoabilidade). Os autores americanos e ingleses tem adotado os termos "running quality" (qualidade de corrimento), "running capacity" (capacidade de corrimento), "runnability" (escoabilidade), "castability" (fundibilidade), "flowability" (floabilidade), "flowing power" (poder de fluir). No Brasil tem sido utilizado o termo fluidez e, algumas vezes, fundibilidade e moldabilidade (3).

Do ponto de vista do fundidor a fluidez de um metal ou liga tem suma importância. A prática mostra que uma das formas de aumentar a fluidez, visando conseguir melhor preenchimento de detalhes, é a elevação da temperatura de vazamento. Porém, esse acréscimo é extremamente indesejável pois acarreta os seguintes problemas (4, 5 e 6): 1) maior tendência à absorção de gases pelo metal líquido, 2) maior tendência do metal reagir com o refratário do forno e material de moldagem, 3) maior consumo de energia 4) pior qualidade superficial da peça fundida, 5) maior tendência a desenvolver trincas de solidificação e 6) estrutura grosseira da peça fundida. No caso de ferros fundidos foi mostrado que a quantidade de porosidades associadas a areia de macho cresce à medida que diminui a fluidez (7).

## 2. DETERMINAÇÃO DA FLUIDEZ

Quando um metal líquido é vazado dentro de um molde, ele flui através da cavidade do molde como resultado de sua pressão hidrostática. Inúmeros fatores se opõem a este fluxo, entre eles as características do metal, a temperatura de vazamento, a natureza do molde e a técnica de vazamento. Portevin e Sebastian (2) propuseram a seguinte formulação matemática para exprimir a fluidez do metal em termos de distância percorrida em uma cavidade de secção constante:

$$l = \frac{C_p \delta (t_v - t_s)}{t_s - T_m} + \frac{C_s \delta}{t_s - t_m} \quad (1)$$

onde:

$l$  = distância percorrida pelo metal

$\alpha$  e  $\beta$  = fatores dependentes da natureza do molde e metal

$C_p$  = calor específico do metal líquido

$\delta$  = densidade do metal líquido

$t_v$  = temperatura de vazamento

$t_s$  = temperatura de solidificação do metal

$t_m$  = temperatura do molde

$C_s$  = calor latente de solidificação do metal

A correlação entre os resultados experimentais obtidos e a formulação matemática acima mostra uma grande dispersão. Na realidade, as variáveis de importância tem efeito marcante sobre a distância percorrida por um metal em um canal. Normalmente caem em três categorias: em primeiro lugar, as variáveis inerentes ao metal, como a composição, a temperatura de vazamento e a presença de filmes e partículas de óxidos. Em segundo lugar, tem importância as variáveis do molde usado, incluindo o formato e a área da secção transversal do canal, o material do molde, a sua rugosidade superficial e a disposição do sistema de alimentação. Finalmente, a última variável de importância é o elemento humano, o qual influi primariamente na maneira como o metal é vazado no molde durante o ensaio.

Diversos ensaios têm sido propostos para avaliar a fluidez de metais líquidos. O seu desenvolvimento tem sido no sentido de eliminar as variáveis ocasionais a fim de obter resultados reprodutivos. A maior parte dos métodos empregados cai dentro de uma das categorias seguintes: 1) ensaio em espiral, 2) ensaio em molde com canal reto, 3) ensaio em molde com canal em U, 4) vazamento através de uma válvula calibrada, e 5) viscosímetro de amortecimento.

O ensaio em espiral foi um dos primeiros métodos desenvolvidos e é ainda um dos mais utilizados (2). A fig. 1 apresenta o esquema típico de uma espiral de fluidez. O seu desenvolvimento tem sido no sentido de eliminar a influência da maneira de vazamento do metal no molde. A técnica consiste hoje em dia em utilizar uma bacia de vazamento com grandes dimensões, com um reservatório lateral que permite manter a pressão metaltática constante (8). Uma outra técnica utilizada para contornar a variável humana é o vazamento em um reservatório colocado sobre a espiral e controlar o fluxo através de uma válvula (9). Dessa maneira é evitada a entrada de gotas de metal frio na espiral, que são causas de grande dispersão de resultados.

O ensaio com canal reto é derivado do método clássico de determinação de viscosidade de escórias, conforme representado na fig. 2 (9). Esse método apresenta a desvantagem de necessidade de um canal demasiadamente longo e extrema precisão no nivelamento (10). Ao mesmo tempo, a secção transversal do canal reto

tem que ser restrita a fim de manter o comprimento do molde dentro de dimensões convenientes. Foram desenvolvidas algumas variantes desse sistema, uma delas sendo o molde em estrela (11) e o molde em pente (12), os quais possuem diversos canais de menor comprimento, cada um com diferente altura. A altura dos canais varia entre 1 e 2,5 mm e comprimento ao redor de 200 mm, contra 1400 mm no caso de um canal com 8 mm de diâmetro.

A utilização de moldes retos permite o estudo da fluidez sob vácuo, o que elimina o efeito da oxidação pelo ar (13).

O ensaio através do molde em U é um desenvolvimento que visa eliminar variáveis como a técnica de moldagem, a técnica de vazamento e a técnica de alimentação. É utilizado nesse ensaio um molde em ferro fundido, conforme representado na figura 3. Os canais A, B e C têm diâmetro reduzido, respectivamente 2 mm, 4 mm e 6 mm (2).

Tanto o molde com canal reto, como o molde em estrela e o molde em U são construídos em material metálico, geralmente o ferro fundido. Estes métodos têm sido aplicados mais regularmente para avaliar a fluidez de metais e ligas não ferrosos, como o cobre, o alumínio, o magnésio e o zinco.

O vazamento através de uma válvula reguladora é um desenvolvimento recente idealizado para controlar as condições de escoabilidade de um metal a ser vazado em lingotagem contínua (14). Esse ensaio está esquematizado na figura 4. O metal é vazado num reservatório que possui, na parte inferior, uma válvula com orifício calibrado. A fluidez é correlacionada com a velocidade com que o metal cai na lingoteira localizada na parte inferior.

A viscosidade do aço líquido pode também ser determinada em um viscosímetro, onde os resultados são baseados nos decrêscimos de amortecimento de vibração torcional de um cadinho contendo o metal líquido (15).

Uma vez bem padronizado o tipo de ensaio e eliminadas as causas de dispersões, podem ser corretamente determinados os principais fatores que influem sobre a fluidez de metais e ligas. Evans (7) classificou em ordem de importância os seguintes fatores relacionados com as propriedades físicas do metal: 1) tensão superficial, 2) temperatura de solidificação, 3) viscosidade, 4) calor específico, 5) intervalo de solidificação, 6) morfologia da cristalização, 7) condutibilidade térmica e 8) presença de óxidos.

Os fatores acima podem ser englobados nos seguintes: 1) constituição das ligas, 2) temperatura de vazamento e 3) processo de desoxidação.

### 3. EFEITO DA CONSTITUIÇÃO DAS LIGAS SOBRE A FLUIDEZ

A distância percorrida pelo metal numa cavidade é afetada pela maneira como que uma liga se solidifica. Ligas com grande

intervalo de solidificação solidificam pela formação de dendritas ramificadas que bloqueiam o fluxo de líquido por formar uma rede no interior da cavidade (16). Nas ligas de menor intervalo de solidificação é formado um filme sólido junto às paredes do molde, o qual não perturba tão pronunciadamente a fluidez. De acordo com esse raciocínio, as ligas com menor intervalo de solidificação são as que apresentam melhor fluidez. No caso de ferros fundidos hipoeutéticos, experiências realizadas mostram que, à medida que aumenta o carbono equivalente até 4,27%, diminui o intervalo de solidificação e aumenta a fluidez. Para a mesma temperatura de vazamento, as composições com o maior carbono equivalente são as que apresentam melhor fluidez, conforme mostra a figura 5 (17).

Na realidade, não existe correlacionamento absoluto entre o intervalo de solidificação e a fluidez, pois acima do eutético (4,27%), o intervalo de solidificação aumenta, contudo a fluidez também se eleva, como pode ser observado na própria figura 5. Com teor de carbono muito alto, bem acima do eutético, a fluidez volta a cair, conforme mostra a figura 6 (18). Possivelmente, as partículas grosseiras de grafita tipo C que ocorrem nos ferros fundidos hipereutéticos prejudicam o livre fluxo de metal. Sendo que são o carbono, o silício e o fósforo os principais elementos que entram na composição de ferros fundidos, a temperatura líquida pode ser calculada em função desses elementos. O conceito de carbono equivalente líquido representa o efeito relativo desses elementos na temperatura líquida, e pode ser expresso através da fórmula:

$$C_{EL} = \%C + \frac{1}{4} \%Si + \frac{1}{2} \%P \quad (2)$$

A fluidez pode ser relacionada com o carbono equivalente líquido pela fórmula (12) :

$$l = k C_{EL} \quad (3)$$

onde:  $l$  = distância percorrida pelo ferro num canal de seção constante  
 $k$  = constante de fluidez, função da temperatura  
 $C_{EL}$  = carbono equivalente líquido

Partindo da expressão acima, o fundidor de ferro pode controlar a composição de maneira a obter a melhor fluidez. Essa flexibilidade não é absoluta, pois é sempre necessário respeitar as propriedades mecânicas, que estão ligadas ao carbono equivalente do ferro fundido.

Quanto aos aços, o fundidor tem poucas possibilidades de modificar a composição, pois a mesma é fixada sob a forma de análise a respeitar ou de características mecânicas a obter. Todavia, de acordo com Mal (19), pode ser dito o seguinte: o carbono tem pouca influência sobre a fluidez diminuindo do aço extra-doce (0,08%C) até aço de médio carbono (0,3%C) e voltando a se

e elevar para aços de alto carbono (0,6%C), conforme mostra a figura 7.

Em aços de baixa liga, os elementos como o manganês, o silício, o níquel e o cobre têm uma influência benéfica sobre a fluidez. Essa influência é mais pronunciada para vazamento em baixa temperatura do que vazamento em alta temperatura. Ainda em aços de baixa liga, o cromo praticamente não influencia a fluidez e o vanádio diminui essa propriedade. Mais importante é o efeito do alumínio, porém não como elemento de liga mas pela sua capacidade de formar filmes de óxidos e inclusões suspensas. As pesquisas anteriores de Taylor et al (20) são concordantes com o trabalho de Mal.

Kasatkin e co-autores (21), estabeleceram valores quantitativos para o efeito da variação de alguns elementos em aços de baixa liga. Considerando um aço contendo 0,25%C, 3,3 a 4,3%Ni, 0,4 a 1,0%Mo, 0 a 1,3%Cu, 0,1 a 0,2%V e 0 a 1,2%Cr, a variação dentro desses limites resulta na seguinte modificação na fluidez do aço, expressa como comprimento de espiral: o níquel produz uma variação positiva de 14%, enquanto que o molibdênio, o cromo e o cobre produzem variações negativas de, respectivamente, 8%, 16% e 6%.

Como pode ser visto, existe uma certa discrepância entre os resultados obtidos por Kasatkin em comparação a de outros autores. Mesmo assim, a variação de fluidez resultante da modificação de composição é sempre pequena em comparação com a resultante de modificação da temperatura de vazamento e presença de óxidos em suspensão.

#### 4. FLUIDEZ E TEMPERATURA DE VAZAMENTO

Sem dúvida nenhuma, a temperatura de vazamento tem influência marcante sobre a fluidez de determinado metal. Como a própria equação (1) o indica, o aumento de temperatura de vazamento tem uma influência direta benéfica sobre essa propriedade. No caso de ferros fundidos o efeito favorável da temperatura é verificado tanto diretamente como também indiretamente pela ação auto-desoxidante a alta temperatura. À medida que a temperatura aumenta, o carbono passa a ter efeito primordial como desoxidante, eliminando partículas de óxidos em suspensão e aumentando continuamente a fluidez de ferros fundidos. Contrariamente, no caso de aços, o aumento de temperatura não se reflete obrigatoriamente em aumento proporcional de fluidez. As reações físico-químicas existentes alteram a formação de óxidos e podem modificar fundamentalmente a fluidez dos aços.

A figura 8 mostra, para o caso de ferros fundidos, que existe uma relação direta entre a temperatura de vazamento e a fluidez. De acordo com Spindler, Pierce e Flinn (8), a fluidez está diretamente relacionada com o grau de superaquecimento de uma liga. Diferentes ligas, de metais ferrosos ou de não ferrosos têm fluidez aproximada para o mesmo grau de superaquecimento acima do líquido. A figura 9, extraída da referência 12, mostra que, no caso de ferros fundidos, o superaquecimento acima do líquido tem mais influência sobre ferros fundidos de maior carbono equivalente.

De maneira geral pode ser dito que, para o caso de metais líquidos, pode ser estabelecida uma relação direta linear entre a fluidez e a temperatura de vazamento (12, 22, 23). No caso de aços a correlação não é linear, como pode ser observado pela figura 7.

## 5. FLUIDEZ DE AÇOS E DESOXIDAÇÃO

Há 40 anos atrás grande parte das peças de aço moldadas eram provenientes de metal produzido em fornos com revestimento ácido, onde o aço era desoxidado principalmente pelo silício, sendo dada pouca importância ao efeito da desoxidação sobre a fluidez (10). Quando o alumínio passou a ser utilizado mais intensamente, foi verificado que os aços assim desoxidados apresentavam baixa fluidez. No instante que um aço líquido recebe a adição de um desoxidante, são formadas partículas de óxidos suspensas no metal líquido, correspondentes à natureza do desoxidante utilizado. A composição e propriedades dessas partículas guardam estreita relação com a sequência de desoxidação utilizada. Essas partículas, denominadas de inclusões endógenas, não são separadas facilmente do meio líquido. Como consequência podem alterar as características físicas do aço líquido. O estudo sistemático do efeito de partículas de óxidos suspensas sobre a fluidez de aços é relativamente recente. A seguir são comentados os resultados obtidos por três diferentes técnicas experimentais:

### 5.1 Pesquisas com o método clássico

O método clássico de ensaio de fluidez consiste no vazamento do aço líquido num molde com um canal estreito, as variantes tendo sido descritas anteriormente. Os resultados experimentais obtidos pela desoxidação do aço com magnésio, com o alumínio e com o silício, estão descritos numa pesquisa de Ershov e Bychev (24). Em cada um desses casos o produto de desoxidação é constituído respectivamente de inclusões de magnésia, de alumina e de sílica. Os resultados experimentais mostram uma redução de fluidez medida pelo decréscimo da distância percorrida pelo metal, de até 9%. O efeito mais marcante é o de inclusões de MgO, seguida pelo de inclusões de  $Al_2O_3$ , sendo que as inclusões de  $SiO_2$  tem menor influência. A fig. 10 mostra os resultados experimentais obtidos, podendo ser observado que o decréscimo de fluidez é tanto maior quanto maior for a quantidade de inclusões.

De acordo com os autores, o decréscimo de fluidez está associado a presença de partículas sólidas constituídas pelas inclusões de óxidos. O efeito mais marcante verificado com as inclusões de MgO e  $Al_2O_3$  está relacionado com a sua maior tendência à orientação. No caso de sílica, apesar de estar no estado sólido a 1600°C, não tem uma estrutura cristalina definida consistindo basicamente de um líquido superresfriado, o qual tem menor efeito sobre a fluidez.

Pesquisas anteriores realizadas por Lilleqvist (25) mostram que aços contendo teor de manganês mais elevado possuem

maior fluidez que aços com baixo teor em manganês, conforme pode ser verificado na figura 11. Na realidade, quando a relação Mn/Si é alta, as inclusões formadas são constituídas de silicato de manganês líquido enquanto que, quando a relação Mn/Si for baixa, as inclusões formadas são constituídas de sílica sólida. Seguindo esse raciocínio, um aço contendo inclusões líquidas tem melhor fluidez do que aços contendo inclusões sólidas.

## 5.2 Ensaio utilizando viscosímetro

Ershov e Gavilin pesquisaram a variação de viscosidade do aço líquido através de um dispositivo que mede o amortecimento de vibrações torcionais (15). De acordo com os autores, o erro na medida da viscosidade não excede mais ou menos 5%. Através desse ensaio foi determinada a variação de viscosidade de um aço limpo resultante da introdução de partículas sólidas de magnésia, zircônia, alumina e sílica. Os resultados experimentais são mostrados nas figuras 12 e 13. Naturalmente, o acréscimo de temperatura resulta num decréscimo de viscosidade. Na figura 12 pode ser observado ainda que é necessário um superaquecimento da ordem de no mínimo 80°C para neutralizar o efeito de inclusões de sílica, as quais, segundo esse ensaio, são as que têm menor efeito sobre a viscosidade. No caso de partículas de magnésia, que têm efeito mais marcante sobre a fluidez, há necessidade de superaquecer o aço em, no mínimo, 200°C para neutralizar o efeito das partículas de inclusões.

Os resultados obtidos pela técnica do viscosímetro, confirmam os resultados obtidos pelo ensaio clássico. A diferença de comportamento entre as inclusões está relacionada com sua forma, quantidade, tamanho e estrutura cristalina, as quais podem influenciar as forças de atrito interno em líquidos heterogêneos.

## 5.3. Ensaio pela passagem de líquido através de uma válvula calibrada

Farrell e Hilty (14), através do arranjo mostrado na fig. 4, estudaram o efeito de diferentes desoxidantes sobre a fluidez de aços. Esta propriedade foi relacionada com a taxa de vazão do aço através de um orifício calibrado. Foi assim pesquisado o efeito da desoxidação por alumínio, silício, silício mais manganês, cério, titânio e zircônio. Os resultados experimentais são mostrados na figura 14. O decréscimo de fluidez está associado a depósitos de partículas de óxido no orifício calibrado, resultando num estreitamento da passagem. Somente as partículas de óxidos refratários podem se acumular no orifício, bloqueando a passagem do líquido. A desoxidação por silício e manganês na proporção preconizada pelos autores, forma inclusões de silicato de manganês líquidas na temperatura de fusão do aço. Não foi observado decréscimo de fluidez para o aço assim desoxidado.

No caso dos demais desoxidantes, as partículas de óxidos formadas se encontram no estado sólido na temperatura de fusão do aço. Como consequência, ocorre um decréscimo da fluidez do aço.

Embora o efeito relativo de cada inclusão não seja o mesmo do obtido nos dois ensaios anteriores, os três resultados experimentais mostram que as partículas de inclusões sólidas têm definitivamente um efeito prejudicial sobre a fluidez.

## 6. ESTUDO DA SEQUÊNCIA DE DESOXIDAÇÃO VISANDO MÁXIMA FLUIDEZ

Independentemente da técnica de ensaio, os resultados experimentais e a prática industrial mostram que inclusões de óxido sólidas prejudicam fortemente a fluidez de metais. Para neutralizar esse decréscimo de fluidez, há necessidade de aumentar substancialmente a temperatura de vazamento, o que traz inúmeras desvantagens.

As inclusões sólidas na temperatura de fusão do aço são obtidas quando for utilizado como desoxidante um dos elementos seguintes: alumínio, silício, zircônio, titânio, magnésio e metais de terras raras (mish-metal).

Para não haver decréscimo de fluidez, o produto de desoxidação deverá ser líquido. Isso seria obtido através de uma desoxidação combinada por manganês e silício, respeitando uma proporção entre os elementos conforme mostrado na figura 15 (26). No entanto, considerando o teor de manganês presente na maior parte dos aços, a quantidade de silício a ser adicionada não seria suficiente para uma desoxidação satisfatória. Como consequência, o aço tem a tendência a desenvolver porosidades durante a solidificação, o que é inadmissível para o caso de peças fundidas. Há portanto necessidade de utilização de um elemento mais energético, sendo que o alumínio é ainda o desoxidante mais vantajoso. A desoxidação por alumínio leva à formação de inclusões refratárias que prejudicam a fluidez. O restabelecimento da fluidez de um aço desoxidado por alumínio pode ser conseguido pela eliminação das inclusões de alumina e modificação da morfologia das mesmas.

A separação das inclusões no aço é feita por decantação, a velocidade de ascensão sendo dada pela lei de Stoke (27):

$$V = \frac{2}{9} \frac{g r^2 (\delta_1 - \delta_s)}{\eta}$$

onde

V = velocidade de ascensão da inclusão

g = aceleração da gravidade

r = raio da inclusão

$\delta_1$  = densidade do aço líquido

$\delta_s$  = densidade da inclusão

$\eta$  = viscosidade do aço líquido

Pode ser observado, pela equação acima, que o fator mais importante é o raio da inclusão. Em virtude das inclusões de alumina terem dimensão reduzida, a sua velocidade de decantação é muito pequena. Como consequência, há necessidade de prolongado tempo de repouso após a adição de alumínio, para ser conseguida eliminação apreciável das inclusões, o que é impraticável.

Uma das maneiras de acelerar a remoção de partículas é o borbulhamento por argônio. A insuflação controlada de argônio no interior do aço líquido acelera a remoção de inclusões. É assim obtida melhor fluidez, como mostrado na figura 16 (28). A técnica de borbulhamento consiste na insuflação de argônio com reduzida vazão através de um plug poroso durante 10 minutos. Este tempo é impraticável para a maior parte das fundições que operam com capacidade de panela relativamente reduzida. Nesse caso, o aço tenderia a congelar a panela.

A outra solução é a modificação da morfologia das inclusões de alumina. Resultados experimentais mostram que a adição de cálcio em aços previamente desoxidados por alumínio, transformam as inclusões de alumina em aluminato de cálcio. O diagrama de fase (figura 17) mostra que é necessário um teor mínimo de cálcio para que as inclusões resultantes da combinação da desoxidação por cálcio e alumínio sejam líquidas a 1600°. Os resultados experimentais confirmam essa hipótese, como mostra a figura 18 (29). A adição de uma quantidade conveniente de cálcio na forma de cálcio-silício restabelece a fluidez do aço pela transformação de inclusões de alumina em aluminato de cálcio. O aumento de fluidez é resultante de dois motivos: 1) as inclusões de aluminato de cálcio são maiores e tendem a flotar com maior velocidade e, 2) são líquidas na temperatura de fusão do aço, não perturbando a fluidez. Esses resultados experimentais foram confirmados por outra pesquisa recente, conforme mostra a figura 19 (30). Novamente, o restabelecimento da fluidez do aço está relacionado com uma quantidade mínima de cálcio que é função da quantidade de alumínio existente.

A quantidade de cálcio a ser adicionado no aço desoxidado pelo alumínio depende da forma de adição de cálcio e da técnica utilizada. Uma das formas de adição mais utilizadas é como liga cálcio-silício ou cálcio-silício-manganês. O cálcio nas ligas à base de silício tem baixa tensão de vapor, o que melhora o seu rendimento.

Quanto à técnica, os processos modernos como o de injeção (31, 32) garantem um bom rendimento do cálcio. Em fundição entretanto, a maneira de introdução de cálcio mais utilizada é a adição de SiCa ou SiCaMn progressivamente durante o vazamento em panela. A prática demonstra que, no caso de aços comuns, é suficiente 0,15 a 0,40% SiCa para a obtenção de máxima fluidez. A quantidade correta depende do estado de oxidação do aço e do teor residual de alumínio. Um exemplo de aumento de fluidez com adição de cálcio é mostrado na figura 20.

## 7. DESOXIDAÇÃO DE AÇOS DE ALTO CROMO, VISANDO MÁXIMA FLUIDEZ

Os aços inoxidáveis e aços refratários, em virtude do alto teor em cromo, têm a tendência de apresentar baixa fluidez. Na realidade, o elevado teor de cromo leva à propensão à formação de inclusões de cromia com temperatura de fusão de 2265°C. A desoxidação do aço inoxidável mostra que a utilização de grandes quantidades de alumínio, leva à formação de inclusões complexas extremamente difíceis de serem eliminadas ou modificadas. A técnica correta consiste em utilizar reduzidas quantidades de alumínio com complementação por cálcio.

Em princípio, a utilização apenas do cálcio como dioxidante deveria ser uma solução satisfatória. No entanto, o cálcio tem baixa solubilidade na maior parte dos aços. Os aços austeníticos, com elevado teor em níquel, constituem exceção. Na realidade, o níquel aumenta sensivelmente a solubilidade do cálcio no aço líquido. Como consequência, é possível desoxidar aços inoxidáveis austeníticos com apenas cálcio-silício ou cálcio-silício-manganês.

Experiências realizadas no IPT (9) mostram que a adição de cálcio-silício em aços austeníticos elaborados em forno de indução, é acompanhada de sensível acréscimo de fluidez. Os resultados experimentais são mostrados na figura 21, onde pode ser observado que a máxima fluidez é encontrada com adições entre 0,6 e 0,8% SiCa. O exame das micrografias mostra que adição de cálcio-silício não reduz o nível de inclusões. Portanto, o acréscimo de fluidez só pode estar associado à modificação da morfologia das inclusões.

## 8. CONCLUSÕES

É de todo o interesse do fundidor obter a máxima fluidez nas ligas, visando o melhor preenchimento de detalhes com utilização da menor temperatura possível. Existem três variáveis metalúrgicas que alteram a fluidez de metais e ligas: temperatura, composição e presença de partículas de óxidos.

O aumento da fluidez pelo acréscimo de temperatura é indesejável, em virtude da maior tendência à absorção de gases, maior tendência à reação de metal molde, maior tamanho de grão e elevada tendência a trincas de solidificação.

A modificação da fluidez pela variação da composição está restrita às especificações do material a ser fundido, sendo sempre de muito reduzida importância.

Foi demonstrado que partículas de inclusões sólidas têm um efeito extremamente prejudicial sobre a fluidez de aços. Há necessidade de superaquecer de 80 a 200°C, para neutralizar o efeito das inclusões refratárias sobre a fluidez de aços.

Aços desoxidados por manganês e silício onde a proporção entre esses elementos foi superior a 3 para 1, ocorre a formação de

inclusões líquidas que não prejudicam a fluidez. No entanto, os aços assim desoxidados são sujeitos ao desenvolvimento de porosidades durante a solidificação. A preferência é pela desoxidação pelo alumínio acompanhada de um tratamento que elimine o efeito das inclusões refratárias formadas.

As inclusões de alumina podem ser parcialmente eliminadas pela insuflação de argônio, sob condições controladas. Essa técnica não encontra ampla aplicação em fundições de aço pela pequena quantidade de material manuseado de cada vez.

A fluidez de aços desoxidados por alumínio pode ser restabelecida por uma adição de cálcio-silício. Dentro das composições normais encontradas, a quantidade recomendada é de 0,15 a 0,40% SiCa.

No caso de aços inoxidáveis austeníticos, pode ser utilizado simplesmente o cálcio-silício como desoxidante, sem prévia adição de alumínio. A quantidade de SiCa que fornece a máxima fluidez está compreendida entre 0,6 a 0,8%.

#### 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - KONDIC, V. - "Experimenting with the measurement of fluidity in the casing of metals". Metals and Materials, out.1972.
- 2 - KRYNITSKY, A.J. - "Progress made in fluidity testing of molten metals during the last ten years". Trans.Am. Found.Soc.,1953, 61, p.399 a 410.
- 3 - BRADASCHIA, C. - Curso de fundição, ABM, 1974, 5<sup>a</sup> ed., p-3-1 a 3-15.
- 4 - SHERSTYUK, A.A.; TUMANSKI, B.F.; GLADKII,S.J.; BREKHOV, N.N. e IZMAILOV, O.P. - "Casting properties of high-manganese steel". Russian Castings Production, nov. 1971, p.461 - 462.
- 5 - FINARDI, J. - "Defeitos superficiais em aços fundidos: causas e soluções". Metalurgia ABM, 37, nº 287, out. 1981, p. 555 a 563.
- 6 - FINARDI, J. - "Trincas de solidificação em aços fundidos : causas e soluções". Fusão, vazamento e solidificação de peças fundidas, Seminário COFUN/ABM, S.Paulo, ago. 1980, p.1 a 24.
- 7 - EVANS, A.A. - "Fluidity vs. core blows in automotive gray iron". Trans. Am. Found. Soc., 62, 1954, p. 492 a 495.
- 8 - SPINDLER, W.A.; PIERCE, W.B. e FLINN, R.A. "Revised spiral test relates fluidity to phase diagram". American Foundryman, set. 1957, p. 56 a 58.

- 9 - SOARES, E.J.F. e MAZZARELLA, V.N.G. - "Fluidez de aços refratários". Rel. IPT, jan. 1981.
- 10 - TAYLOR, H.F. - "The fluidity of cast steel: its measurement, its meaning and its value to the foundryman". Electr. Furn. Steel Proc., 1945, p. 252 a 274.
- 11 - KONDIC, V. - "Fluidity testing development". Foundry Trade Journal, 12 jan. 1956, p. 31 a 36.
- 12 - SESHADRI, M.R. e RAMACHANDRAN, A. - Fluidity and casting fluidity of molten cast iron". Trans. Am. Found. Soc., 1956, 64, p. 263 a 272.
- 13 - BARLOW, G. e BEELEY, P.R. - "The flow of liquid metals in fine passages". The British Foundryman, março 1970, p. 61 a 69.
- 14 - FARRELL, J.W. e HILTY, D.C. - "Steel flow through nozzles: influence of deoxidizers". El.Furn. Proceedings, 29, 1971, p. 31-46.
- 15 - ERSHOV, G.S. e GAVRILIN - "Effect of non-metallic inclusions on the viscosity of molten steel". Steel in the USSR, out. 1974, p. 816 e 817.
- 16 - WEBSTER, P.D. - "Some observations and experiments on fluidity". The British Foundryman, dez. 1965, p. 470 a 475.
- 17 - LEVI, L.I. e KLETSKIN, G. - "Fluidity of cast iron". Russian Castings Production, fev. 1972, p. 119.
- 18 - PANOVA, E.M.; TSVIK, B.; YAKOVENKO, R.F. e FOMINYKH, J.P. - "Fluidity of blast furnace pig iron". Steel in the USSR, jan. 1975, p. 7 e 8.
- 19 - MAL, A. - "Considération sur la coulabilité des fontes et des aciers". La Fonderie Belge, 1969, 7/8, p. 197 a 200.
- 20 - TAYLOR, H.F.; ROMINSKY, E. e BRIGGS, C.W. - "Fluidity of ingot iron and alloy cast steels". Trans.Amer. Foundrymen Assoc., 49, 1941, p.1.
- 21 - KASATKIN, G.N.; LUTSKOW, V.S.; GUGLIN, N.N. e SAMSONOV, V.I. - "Effect of steel composition and of deoxidation practice on the resistance of steel to cracking and fluidity". Steel in the USSR, set. 1973, p. 740 a 742.
- 22 - RABINOVICH, A.R. - "Casting properties determining the mould filling capacity of alloys". Russian Casting Production, julho 1976, p. 330 a 332.
- 23 - VARENIK, P.A. e PRIMEROV, S.N. - "Fluidity of alloys". Russian Casting Production, maio 1976, p. 217.

- 24 - ERSHOV, G.S. e BYCHEV, V.M. - "Influence of non-metallic inclusions and gases on the fluidity of molten iron". Steel in the USSR, jun. 1975, p. 298.
- 25 - LILLIEQVIST, G.A. - "Temperature measurement and fluidity tests". Proc. Electr. Furn. Steel Conf., 1949, p. 99 a 104.
- 26 - BRIGGS, C.W. e SIMS, C.E. - "The effect of various deoxidizers on cast steel". 25th Foundry Congress, 1958.
- 27 - BODSWORTH, C. e BELL, H.B. - "Formation and removal of deoxidation products". Physical Chemistry of Iron and Steel Manufacture, Longman, 1972, p. 418 a 427.
- 28 - BAECHTOLD, H. e WALDVOGEL, W. - "Erfahrungen in der Stahlgiesserei beim Spülen von Schmelzen mit Argon in der Giesspfanne". Giesserei, 56, nº 11, 22 maio 1969, p. 23 a 318.
- 29 - GATELLIER, C.; JACQUEMOT, A.; HENRY, J.M. e OLETTE, M.H.R. - "Controle da morfologia das inclusões de aços desoxidados pelo alumínio". Metalurgia ABM, 33, nº 234, maio 1977, p. 275 a 284.
- 30 - FAULRING, G.M.; FARREL, J.W. e HILTY, D.C. - "Steel flow through nozzles: influence of calcium". El.Furnace Proc., 37, 1979, p. 219 a 229.
- 31 - OBERG, K.E. e WEISS, F.J. - "The Scandinavian Lancers ladle injection metallurgy system". El.Furnace Proc., 36, 1978, p. 54.
- 32 - FINARDI, J. - "Tratamento de aços por injeção: estado atual da técnica". Simpósio Coaço/Coref/ABM, dez. 1981.
- 33 - SHERSTYUK, A.A. et al - "Casting properties of high-manganese steel". Russian Castings Production, nov. 1971, p.461 e 462.
- 34 - PRUSSIN S.A. e FITTERER, G.R. - "Some requirements for successful fluidity testing". Trans.Am. Fund. Soc., 1958, 66, p.143 a 149.

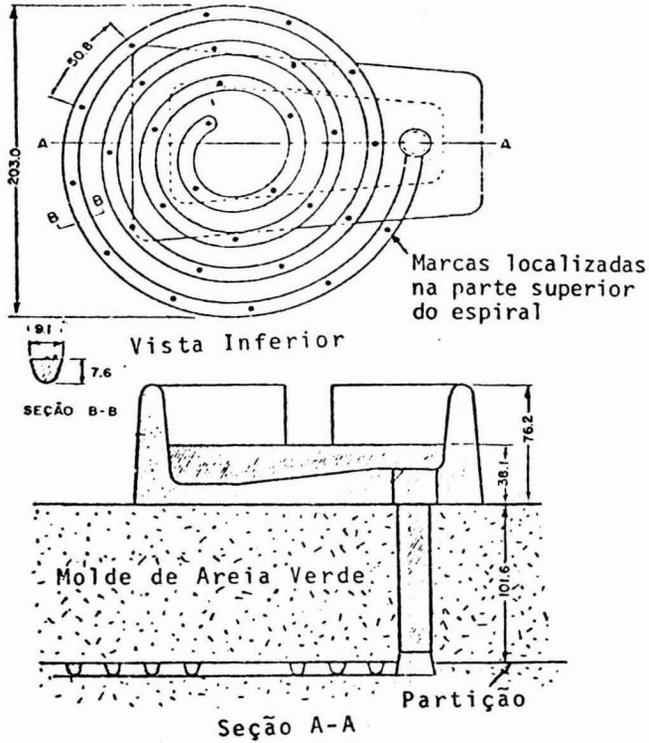


Fig. 1 - Desenho da espiral para determinação da fluidez (Krynitsky, ref. 2)

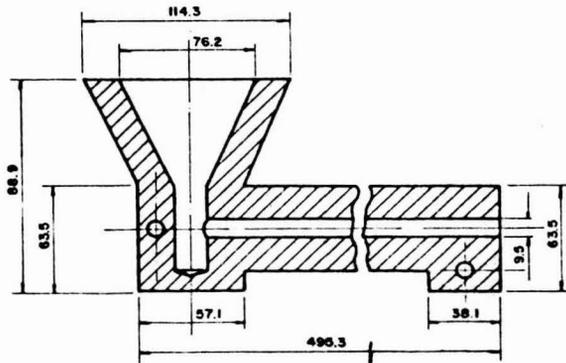


Fig. 2 - Fluidímetro desenvolvido para a determinação da viscosidade de escórias (Prussin e Fitterer, ref. 34)

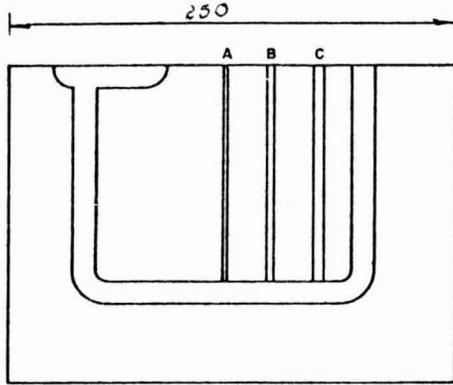


Fig. 3 - Esquema do molde em U para o ensaio de fluidez de metais (Krynitsky, ref. 2)

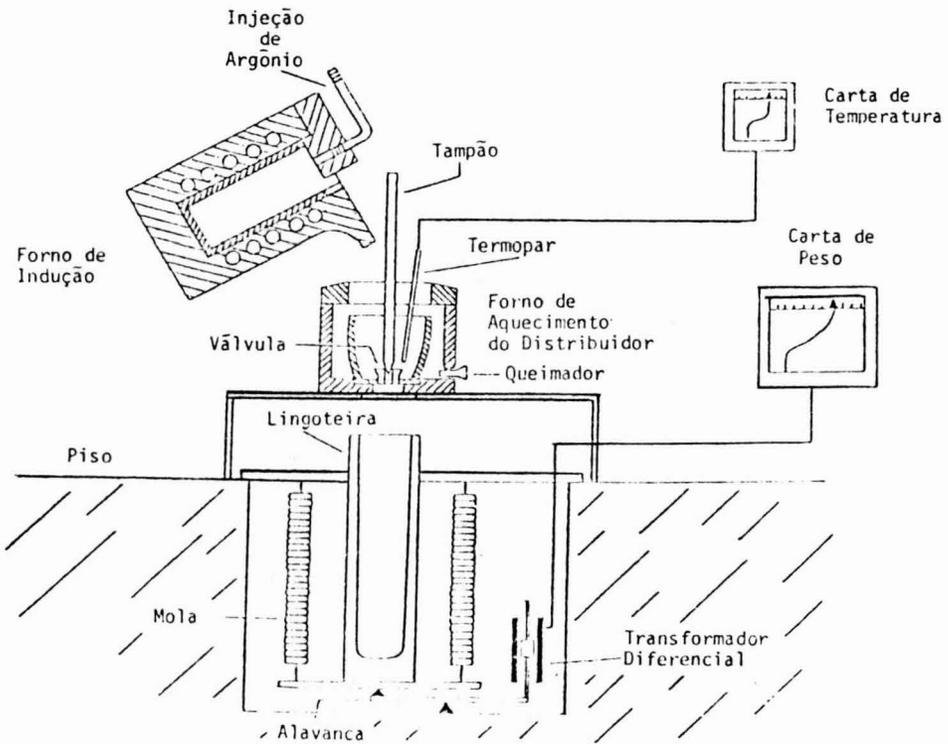


Fig. 4 - Arranjo do sistema para determinação de velocidade de vazamento através de uma válvula calibrada (Farrel e Hilty, ref.14)

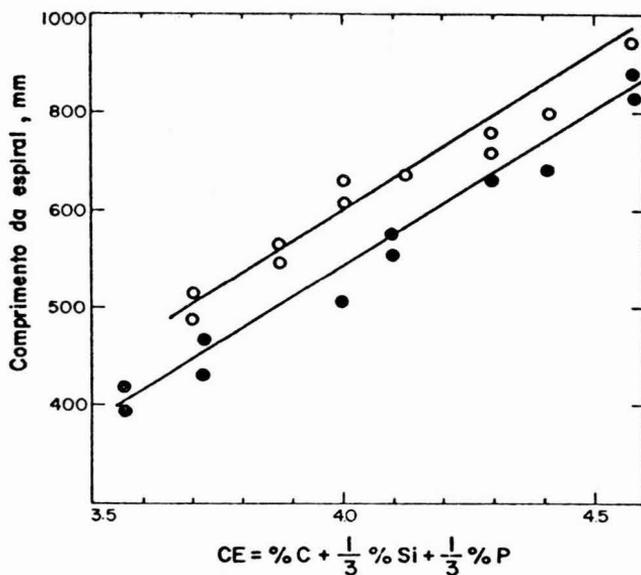


Fig. 5 - Efeito do carbono equivalente de dois ferros fundidos vazados a 1350°C sobre a fluidez (Levi e Kletskin, ref. 17)

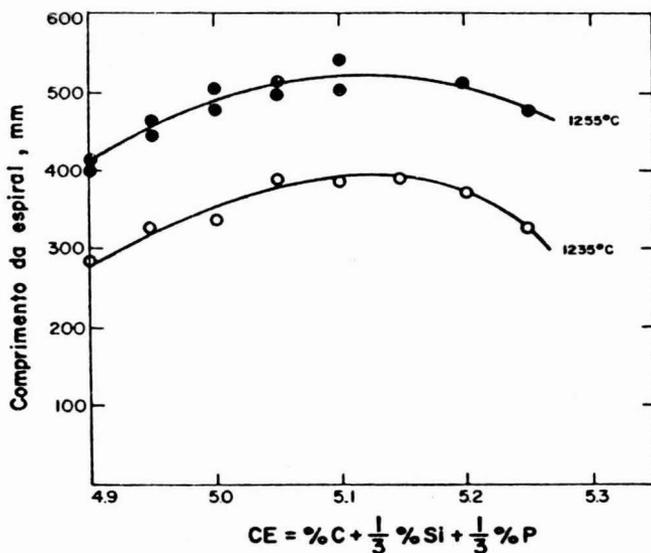


Fig. 6 - Efeito do carbono equivalente sobre a fluidez de ferros fundidos hipereutéticos a duas temperaturas (Panova, ref. 18)

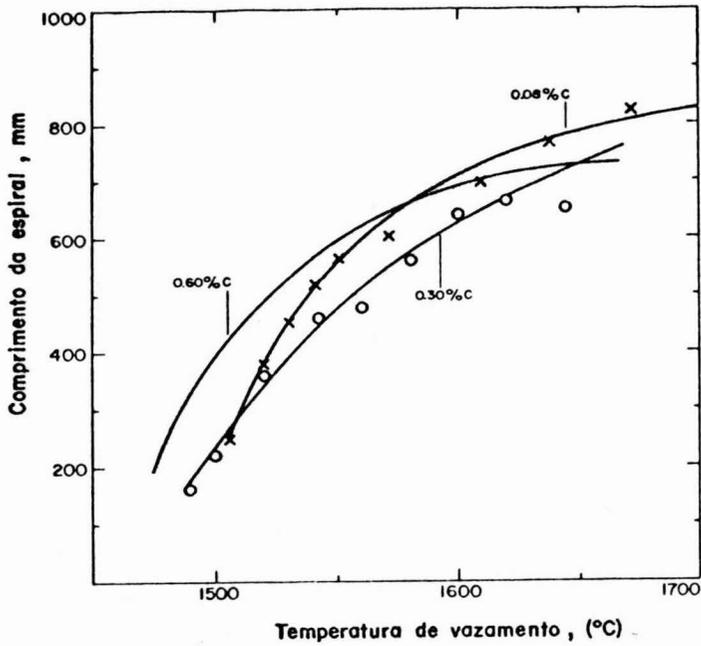


Fig. 7 - Influência do teor em carbono sobre a fluidez de aços contendo 0,73% Mn e 0,36% Si (Taylor, ref.20)

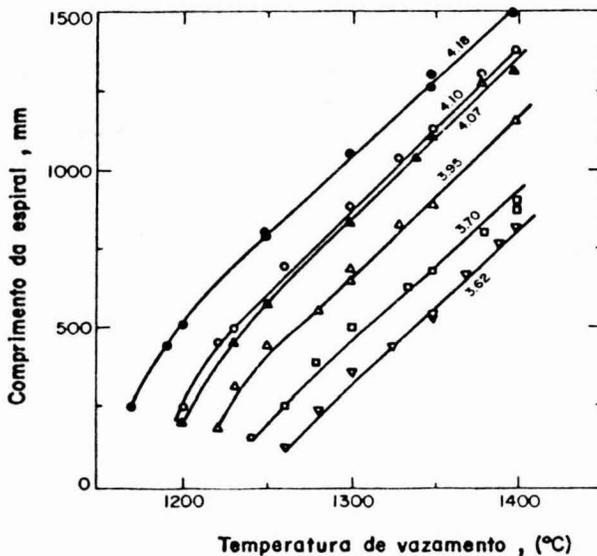


Fig. 8 - Relação entre a fluidez e a temperatura de vazamento de ferros fundidos com diferentes carbonos equivalentes líquidos (Seshadri e Ramachandran, 12)

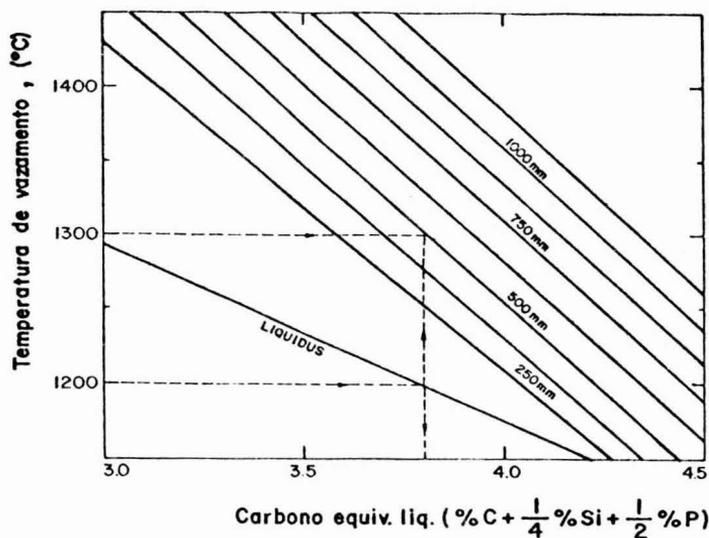


Fig. 9 - Diagrama mostrando o efeito de superaquecimento sobre o comprimento da espiral com ferros fundidos com diferentes carbonos equivalentes líquidos (Seshadri e Ramachandran, 12)

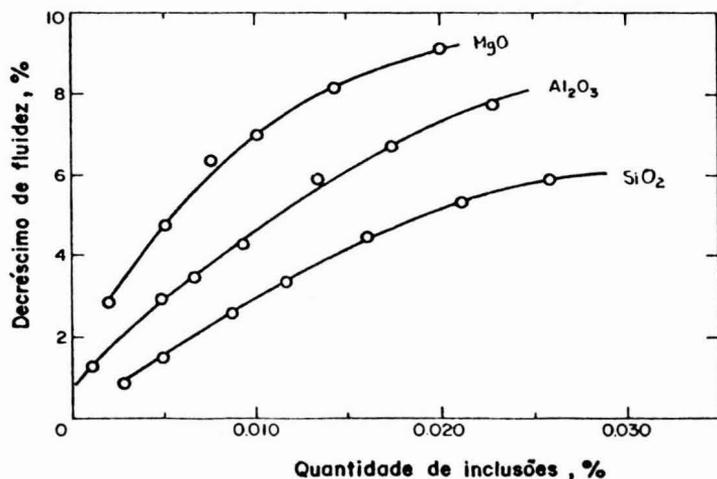


Fig. 10 - Efeito da quantidade e tipo de inclusão sobre o decréscimo de fluidez no ferro a 1600°C. A fluidez está relacionada com a distância percorrida pelo metal em um tubo de quartzo (Ershov e Bychev, ref.24)

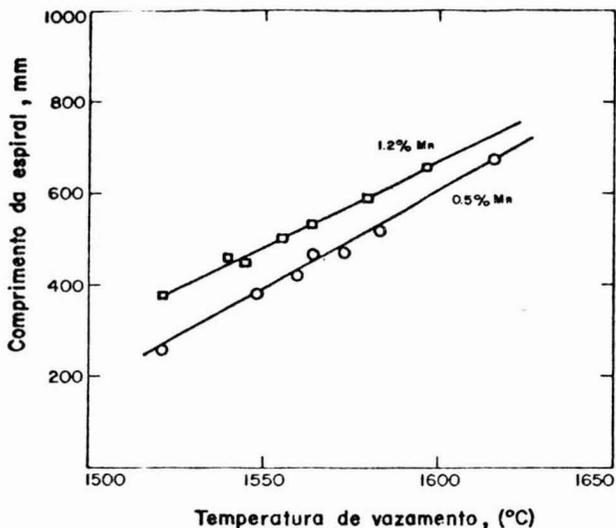


Fig. 11 - Efeito do teor de manganês sobre a fluidez de aço baixo carbono contendo 0,30%Si (Lillieqvist, ref. 25)

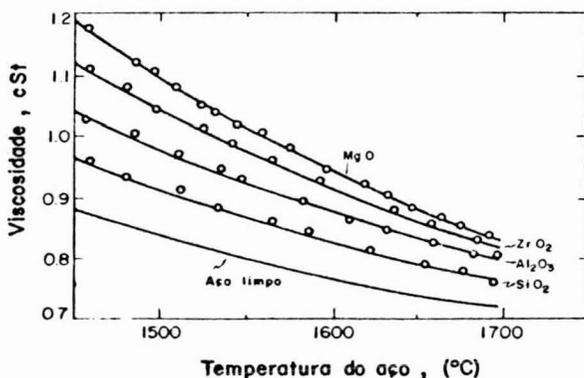


Fig. 12 - Efeito do tipo de inclusao sobre a viscosidade de aço para rolamentos. A quantidade de inclusões é constante, 0,01% (Ershov e Gavrilin, ref.15)

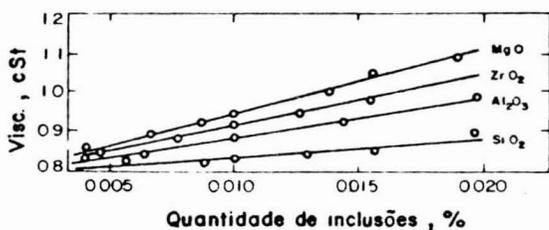


Fig. 13 - Efeito da quantidade de inclusões sobre a viscosidade de aço para rolamentos na temperatura de 1600°C (Ershov e Gavrilin, ref. 15)

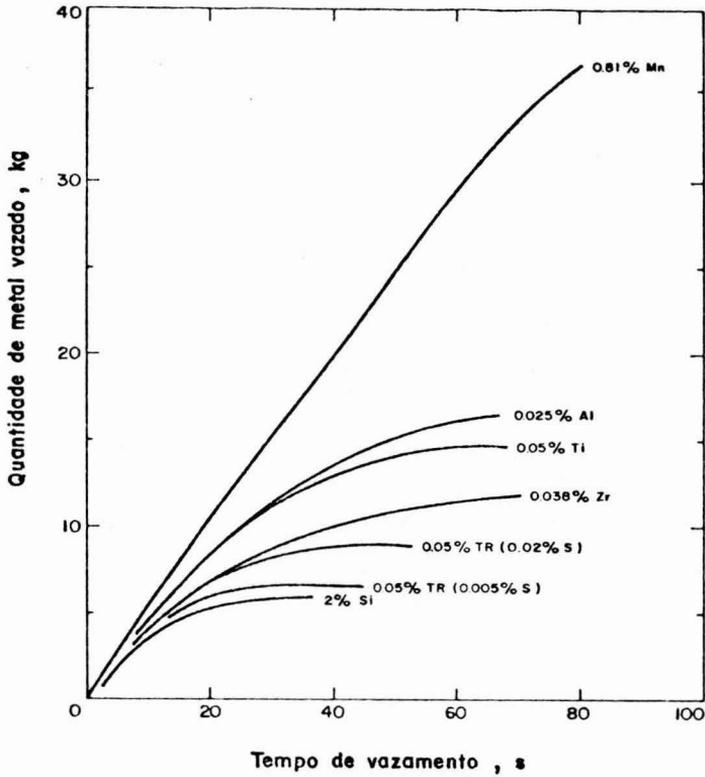


Fig. 14 - Efeito da desoxidação sobre a quantidade de aço vazado através de uma válvula, composição 0,4%C, 0,28%Si e 0,81%Mn (Farrel e Hilty, ref. 14)

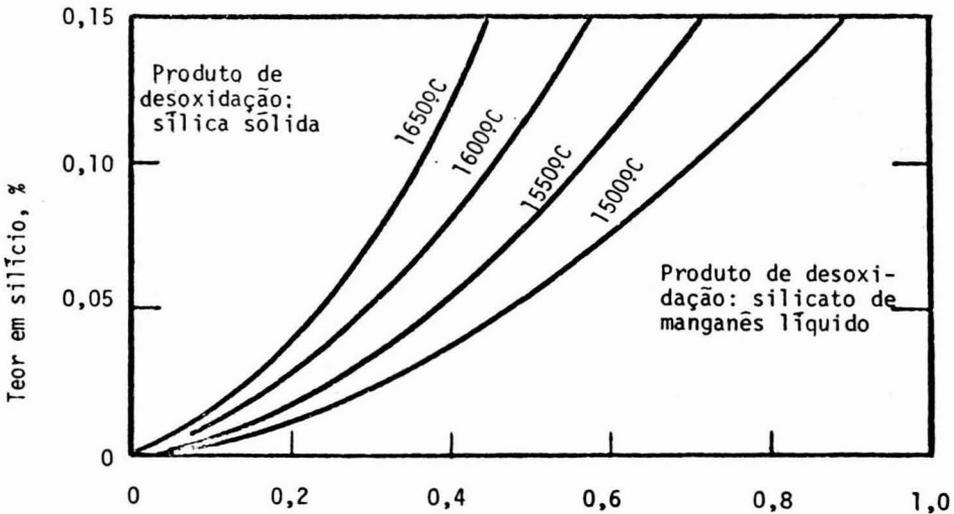


Fig. 15 - Inclusões obtidas em função do teor em Mn e Si no aço e temperatura (Brigg e Sims, ref. 26)

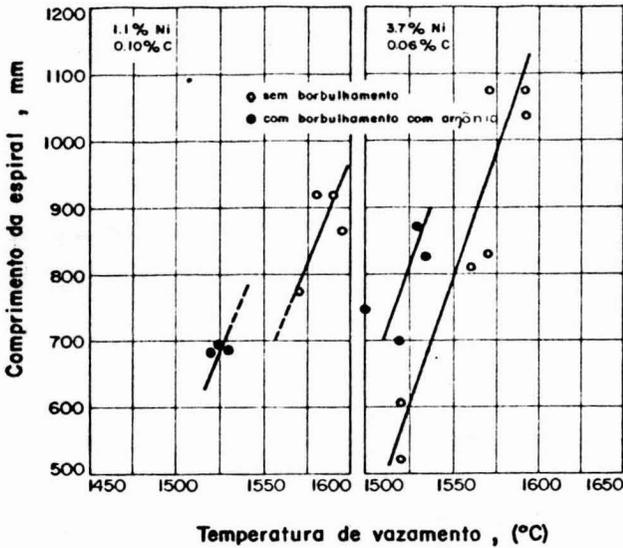


Fig. 16 - Efeito do borbulamento por argônio sobre a fluidez de aço contendo 12,5%Cr, 0,5%Mn e 0,5%Si (Baechtold e Waldyoqel, ref.28)

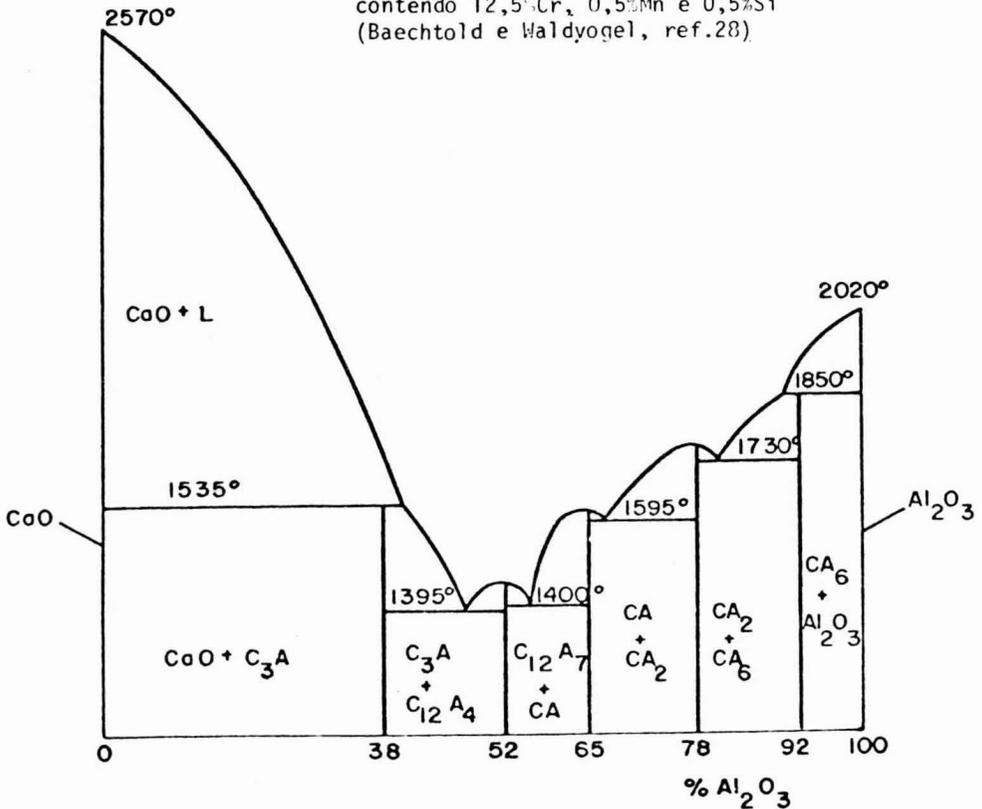


Fig. 17 - Diagrama de fase calcia-alumina.

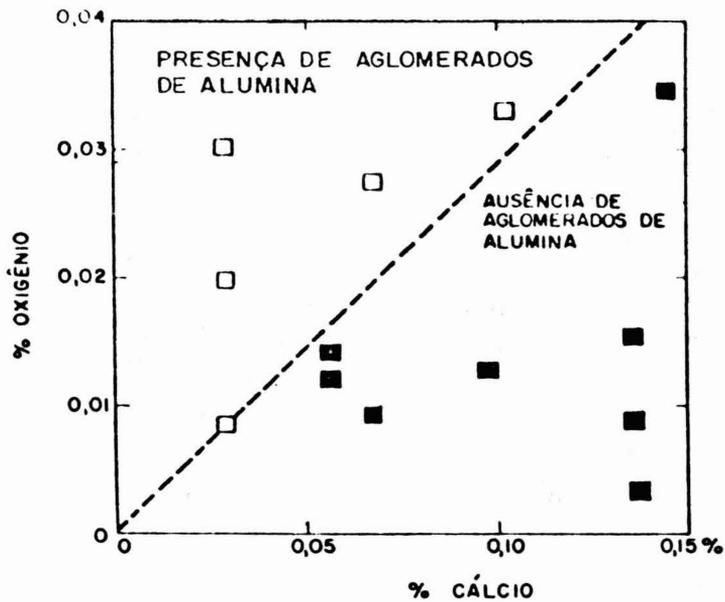


Fig. 18 - Modificação de inclusões de alumina pela adição de cálcio (Gatellier et al, ref.29)

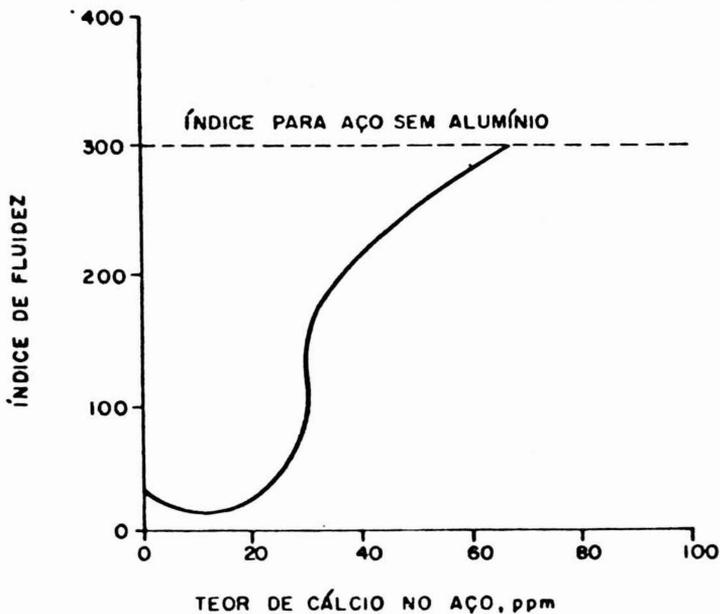


Fig. 19 - Efeito do teor de cálcio sobre a fluidez de um aço contendo 0,05%Al (Faulring et al, ref. 30).

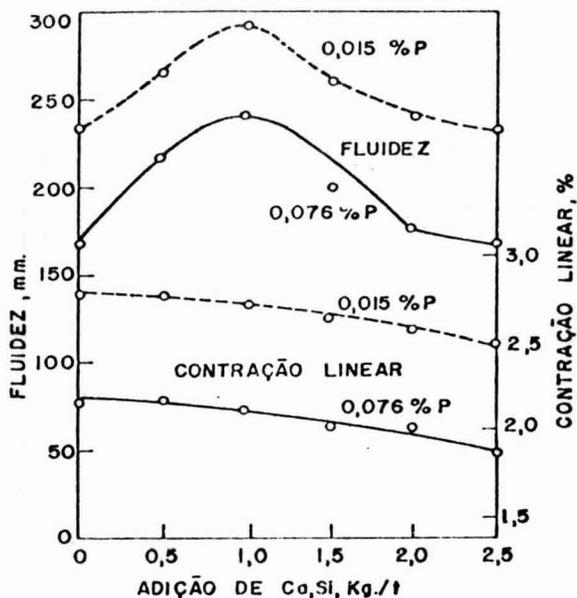


Fig. 20 - Efeito da adição de SiCa sobre a fluidez de aço manganês austenítico (ref. 33).

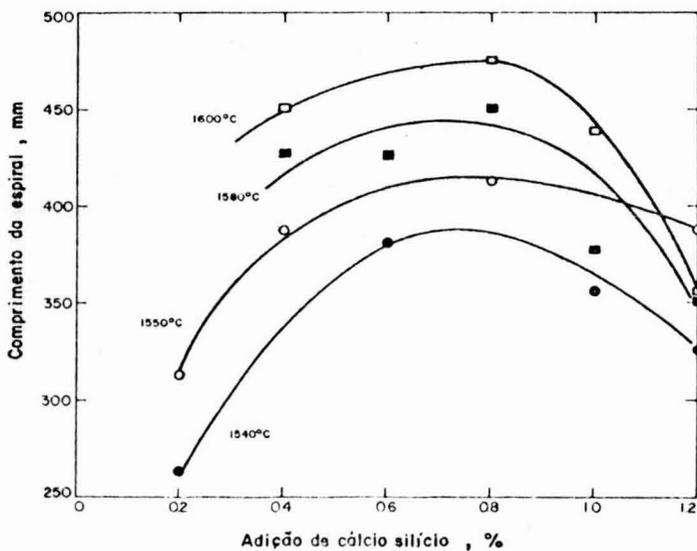


Fig. 21 - Efeito da desoxidacao por cálcio silício sobre a fluidez de aço AISI-III, contendo 26%Cr e 12%Ni (Soares e Mazzarella, ref. 9)