

ALGUMAS PROPRIEDADES DOS METAIS LÍQUIDOS QUE INTERESSAM À TÉCNICA DE FUNDIÇÃO ⁽¹⁾ ⁽²⁾

CLOVIS BRADASCHIA ⁽³⁾

RESUMO

Dentre as propriedades dos metais líquidos, o Autor procura analisar aquelas que mais interessam à técnica de fundição, a saber: oxidação dos metais líquidos; reações dos metais líquidos com o meio ambiente; viscosidade e tensão superficial dos metais líquidos; conceito de fluidez e sua importância em fundição. A solubilidade de gases nos metais líquidos é objeto de outro trabalho, publicado a seguir.

1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

A *fundição* vem a ser a conformação de um metal no estado líquido. Tal processo consiste em aquecer o metal até que êle se funda e se transforme em um líquido homogêneo; em seguida, êste líquido será vertido em moldes adequados onde, ao solidificar-se, adquirirá a forma desejada. Nesta definição encontram-se implícitos dois grupos independentes de operações:

- a) As que têm por finalidade fundir o metal, isto é, transformá-lo em um líquido homogêneo; e
- b) As que têm por finalidade produzir o molde, qualquer que seja êle.

No presente trabalho não será estudado nem o primeiro e nem o segundo grupo de operações. Serão analisados, tão somente, os principais fenômenos que se dão enquanto o metal permanece líquido, decorrentes de suas propriedades intrínsecas

(1) Contribuição Técnica n.º 500. Apresentada ao XVIII Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais; Belo Horizonte, julho de 1963.
(2) Este trabalho foi objeto de uma aula, ministrada pelo Autor, no Curso de Fundição que presentemente se desenvolve em São Paulo.
(3) Membro da ABM e Engenheiro Metalurgista; Professor de FUNDIÇÃO E PROCESSOS ESPECIAIS, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; Diretor de "CLOVIS BRADASCHIA" Engenheiros Consultores Ltda.; São Paulo, SP.

e de suas relações com o meio, desde o momento de início da fusão até o instante de início de solidificação, após o seu vazamento no molde.

Dentro do espírito assinalado, serão analisadas aquelas propriedades dos metais líquidos que interessam, direta ou indiretamente, à técnica de fundição.

Como, via de regra, nas condições normais de fundição, os metais são fundidos em contacto com a atmosfera e com outros gases resultantes da combustão, nos fornos de fusão, verifica-se que eles tendem a reagir com o meio gasoso que os circunda, resultando em sua *oxidação* parcial, a qual provoca *perdas* durante a fusão e o vazamento; além disso, os demais gases que envolvem o metal líquido, ou em fusão, tendem a reagir com êle, acarretando importantes conseqüências futuras, como se verá no desenvolver dêste trabalho. Por outro lado, ao ser fundido, um metal deverá estar contido em um recipiente, seja êle um cadinho refratário ou metálico, com o qual poderá reagir; além disso, o metal poderá ser coberto por uma escória de refino, ou simplesmente protetora, com a qual também poderá reagir. Finalmente, ao ser vazado, a maior ou menor facilidade com que se encherá o molde, dependerá de sua *fluidéz*. Esta, por sua vez, será função da *viscosidade* e da *tensão superficial* do metal ou liga considerada, além de outros fatôres, como veremos adiante.

Resumindo, o estudo das propriedades dos metais líquidos poderá ser feito segundo o seguinte esquema:

- Oxidação dos metais líquidos, perdas devidas à oxidação; outras perdas durante a fusão e o vazamento;
- Tensão de vapor dos metais líquidos;
- Reações entre metais líquidos e substâncias não gasosas;
- Viscosidade dos metais líquidos;
- Conceito de "*fluidéz*" e sua importância em fundição;
- Estudo da solubilidade de gases nos metais líquidos: seus efeitos e fundamentos dos processos de sua eliminação.

A figura 1 dá uma ilustração esquemática das fases presentes possíveis, durante a fusão e enquanto o metal permanecer líquido. Por facilidade didática vamos considerar o metal contido em um cadinho, estando em contacto, na parte livre superior, com a atmosfera e com gases da combustão.

As reações indicadas (possíveis), na figura 1, podem afetar profundamente as propriedades intrínsecas do metal, com repercussão nítida sobre os *fenômenos de solidificação* do metal no molde e sobre as qualidades e propriedades das peças obtidas.

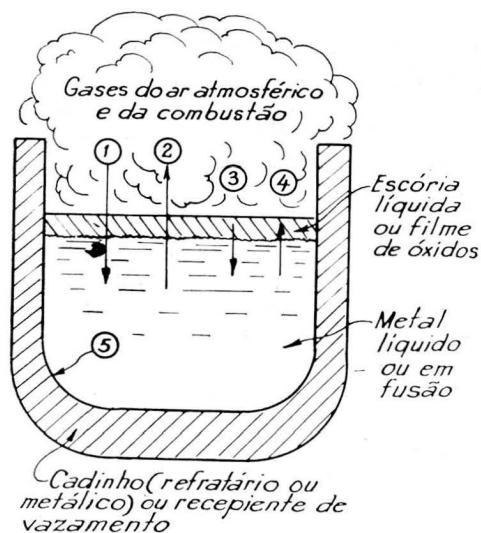


Fig. 1 — Ilustração esquemática das fases presentes possíveis, durante a fusão e enquanto o metal permanecer líquido:

- (1) Solubilidade de gases no metal líquido;
- (2) Reações geradoras de gases no metal e desenvolvimento de vapores;
- (3) e (4) Trocas metal \leftarrow escória; \rightarrow escória;
- (5) Reações do metal com o recipiente que o contém.

2. OXIDAÇÃO DOS METAIS LÍQUIDOS; PERDA DE METAL DURANTE A FUSÃO E O VAZAMENTO

Os metais líquidos são sujeitos à oxidação quando em contacto com o ar ou com as atmosferas oxidantes dos fornos. E os fenômenos de oxidação são muito importantes durante a fusão e o vazamento. O estudo deste assunto pode ser encarado sob dois aspectos:

- Aspecto tecnológico, no qual se analisa principalmente as perdas de material metálico durante a fusão;
- Aspecto científico, no qual se estuda a afinidade dos diversos metais pelo oxigênio, a oxidação preferencial, etc.

O aspecto científico do problema já foi suficientemente estudado nos pontos 27¹ e 28² do Curso "Princípios Básicos da Metalurgia", ministrado em 1958/59, sob os auspícios da Associação Brasileira de Metais³.

Aspectos tecnológicos da oxidação dos metais líquidos; perdas por oxidação ⁴ — Quando ligas sólidas são fundidas, ou quando ligas são preparadas por fusão dos seus diversos constituintes, normalmente existem perdas por oxidação sob a forma de “drosses” (de “dros”, termo de origem norte-americana, empregado para designar mistura sólida de óxidos metálicos). Estas são particularmente peculiares aos metais não-ferrosos. As perdas por oxidação são suplementadas por outras, tais como: volatilização de um ou mais elementos de liga durante a fusão; arrastamento de metal em operações de “drossagem” (isto é, limpeza superficial do banho, operação comumente denominada “escumagem”); por penetração e contaminação de cadinhos e utensílios durante a fusão e vazamento e por respigos de metal durante as operações de vazamento.

Tôdas as perdas consideradas vão resultar em diminuição do pêso útil de metal. O “rendimento metálico de fusão” será a relação entre o pêso final de metal vazado e solidificado em moldes e o pêso de metal carregado para fusão. Esse rendimento depende de diversas variáveis. Para ilustrar o que foi dito serão apresentadas, a seguir, diversos exemplos.

A fusão de latões (ligas cobre-zinco) em fornos de cadinho pode se dar com perdas de fusão variando de menos de 1% até 5% (em pêso), ou mais. Muitos fatores contribuem para estas perdas, entre as quais se incluem os cuidados e a técnica de trabalho. No caso considerado dos latões, quanto maior o teor de zinco, maiores serão as perdas de fusão e de vazamento. De um modo geral, para qualquer liga, as perdas serão tanto maiores quanto maiores forem os teores de elementos altamente oxidáveis. É o que ilustra a tabela 1, para ligas fundidas sob condições ligeiramente oxidantes.

TABELA 1

Tipo de liga	Perda de fusão (% em pêso)
Latão com baixo teor de Zn (até 2% de n)	0,3 a 0,5 Zn
Latão com médio Zn (2% a 5% Zn)	0,5 a 0,7 Zn
Latão com mais alto Zn (5% a 12% Zn)	1,0 Zn
Bronze ao chumbo (com 5% Pb)	0,3 Pb
Bronze ao chumbo (com 10% Pb)	0,5 Pb
Bronze ao chumbo (com 15% Pb)	1,0 Pb
Bronze do estanho (com 10% Sn)	0,2 a 0,3 Sn
Bronzes fosforosos (até 0,5% P)	0,1 P
Bronzes fosforosos (até 1,0% P)	0,15 P
Latões de alto Zn (30% a 40% Zn)	1% Zn
Bronzes de alumínio (8% a 10% Al)	0,2 a 0,3 Al

Nos fornos em que os gases da combustão entram em contacto com os metais (como nos fornos de cadinho e nos fornos reverberatórios a combustível) as perdas são bem maiores que nos fornos elétricos (seja de cadinho, reverberatório, de indução, etc.).

Por exemplo ⁴: a mesma liga de alumínio, fundida em cadinhos de 350 kg de capacidade, deu as seguintes perdas:

- a) Em forno a óleo:
 - Perda de fusão: 1,9%;
 - Perda total de fundição (incluindo as perdas de vazamento): 3,6%;
- b) Em forno de indução de baixa freqüência:
 - Perda de fusão: 0,5% a 0,8%;
 - Perda total de fundição: 1,4%.

As perdas de fusão dependem também das dimensões do material metálico carregado. Quanto mais leve fôr êste, maiores serão as perdas. Zeerleder ⁵, analisando êste assunto para o caso de ligas de alumínio e para diversos tipos de fornos, chegou às seguintes perdas, em %:

Lingotes	0,8 a 2,0
Sucata graúda	1 a 3
Retalhos de chapas	1,5 a 4
Retalhos de fôlhas	2 a 10

Para um mesmo tipo de carga e para uma dada liga, as perdas de fusão são mínimas em fornos elétricos de indução e máximas em fornos reverberatórios a combustível.

Recursos para se atenuar a oxidação — Procurando-se atenuar as perdas por oxidação, durante a fusão, costuma-se lançar mão de diversos recursos, entre os quais podem ser enumerados os seguintes:

- a) Emprêgo de atmosferas protetoras, que podem ser neutras ou redutoras; entre as neutras citam-se as de azôto e hélio, que impedem a oxidação do metal que está sendo fundido e que também não devem reagir com êle. Entre as atmosferas redutoras, isto é, capa-

zes de reduzir os óxidos existentes, citam-se as de hidrocarbonetos gasosos, de hidrogênio e de monóxido de carbono. Esta última atmosfera pode ser facilmente obtida recobrando-se o banho metálico com fragmentos de carvão de madeira ou coque.

O emprêgo de atmosferas redutoras constituídas de hidrocarbonetos gasosos, ou de hidrogênio puro, deve ser feito com muita prudência. De fato, para muitas ligas, uma atmosfera ligeiramente oxidante não só é menos nociva que uma redutora, como é mesmo aconselhada para eliminar o hidrogênio anteriormente absorvido pelo metal ou para impedir sua absorção. Deve-se sempre ter em mente que a absorção de hidrogênio, pelo metal líquido, quase sempre acarreta conseqüências mais graves que a do oxigênio. Além disso, facilmente êste último poderá ser eliminado por uma operação final de *desoxidação*, antes do vazamento.

- b) Emprêgo de escórias protetoras, de composições as mais diversas (à base de sílica, de borax ou de misturas salinas complexas).

Meios usuais para se inibir a oxidação de metais puros e de ligas metálicas, durante a fusão — Sabe-se que os metais puros e as ligas metálicas tendem a se oxidar durante a fusão e a permanência no estado líquido, quando em contacto com a atmosfera. Por outro lado, as observações mostram que as características de oxidação de metais líquidos podem ser profundamente alteradas por adições de outros elementos, por vêzes em teores mínimos. Há elementos que aceleram a oxidação; outros inibem-na quase completamente. Assim, por exemplo, ligas alumínio-magnésio, com cêrca de 10% de Mg, apresentam grande tendência à oxidação, com a produção de grandes volumes de "drosses". Esta oxidação pode, no entanto, ser quase completamente inibida por uma pequena adição de 0,02% de berílio.

Outros exemplos: nos latões, as perdas de zinco por oxidação e evaporação podem ser grandemente atenuadas por pequenas adições de alumínio, da ordem de 0,1% a 0,3%; nos bronzes fosforosos, mínimos teores de silício diminuem grandemente as perdas de fósforo por oxidação; no caso do cádmio pode-se suprimir quase inteiramente sua oxidação, durante a fusão, mediante adição de 0,05% de zinco. É assim por diante. A explicação do fenômeno poderia ser a seguinte:

- O elemento inibidor adicionado se oxidaria preferencialmente aos demais elementos presentes;

— O filme de óxido formado, nestas condições (provavelmente constituído de óxidos complexos), protegeria o metal líquido de ulteriores oxidações.

3. TENSÃO DE VAPOR DOS METAIS LÍQUIDOS

Às temperaturas empregadas, na prática normal de fundição, a pressão de vapor da maioria dos metais comuns é bastante fraca. A principal exceção a esta regra é o zinco, o qual, sob pressão atmosférica normal, ferve a pouco mais de 900°C. Por esse motivo os latões perdem zinco por volatilização, durante a sua fusão. O cádmio e o magnésio constituem também exceções dignas de nota. Na Tabela 2, extraída do "Metals Handbook", edição de 1961⁶, tem-se os pontos de fusão e de vaporização dos elementos metálicos mais comuns, sob pressão de uma atmosfera:

TABELA 2

Elemento	Símbolo	Ponto de fusão (°C)	Ponto de ebulição (°C)
Alumínio	Al	660	2450
Antimônio	Sb	630,5	1380
Cádmio	Cd	320,9	765
Chumbo	Pb	327,4	1725
Cobre	Cu	1083,0	2595
Ferro	Fe	1536,5	3000
Magnésio	Mg	650,0	1107
Zinco	Zn	419,5	906

De modo aproximado, pode-se calcular a pressão de vapor (p) de um metal em função da temperatura absoluta T , pela seguinte expressão:

$$\log p = \frac{A}{T} + B \log T + CT + D$$

onde os parâmetros A , B , C e D já se encontram tabelados, para muitos metais⁷.

A Tabela 2 mostra-nos que os metais que possuem baixo ponto de ebulição, tais como Cd, Mg e Zn, devem ser fundidos com o mínimo superaquecimento possível, para que não se percam sob a forma de vapor.

4. REAÇÕES ENTRE METAIS LÍQUIDOS E SUBSTÂNCIAS NÃO-GASOSAS

Os metais são geralmente fundidos em contacto com materiais refratários cujos constituintes principais são óxidos, tais como sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), magnésia, óxido de cromo (Cr_2O_3), etc. Entre estes óxidos e os metais líquidos podem ocorrer importantes reações. Assim, por exemplo, o magnésio nunca deve ser fundido em recipiente silicioso por causa da reação:



Do mesmo modo, os refratários de carboneto de silício são rapidamente atacados por magnésio fundido e por ligas de alumínio contendo apreciável teor de magnésio.

Alguns metais podem também ser fundidos em cadinhos metálicos sem maiores inconvenientes, enquanto que outros não. Por exemplo: o ferro é rapidamente atacado por cobre e alumínio fundidos. No entanto, a adição, ao ferro, de certos elementos como cromo e alumínio retarda grandemente este ataque. Por outro lado, banhos de Mg, ou de Sn, Pb e Zn, não atacam apreciavelmente os cadinhos de ferro fundido ou de aço fundido, materiais estes que são utilizados na confecção de cadinhos para a fusão daqueles metais.

Outras reações muito importantes são aquelas que costumam ocorrer entre metais líquidos e escórias líquidas. Estes equilíbrios entre líquidos metálicos e não-metálicos costumam ocorrer em todos os setores da metalurgia extrativa e de refino, tanto de ferrosos como de não-ferrosos.⁸ O refino do aço, por exemplo, baseia-se principalmente nestas trocas entre escória líquida e metal líquido.

Na fundição de metais não-ferrosos, o emprêgo de escórias tem um papel muito importante. Certas escórias têm um papel exclusivamente protetor, impedindo a oxidação do metal durante a sua fusão. É o caso do magnésio, por exemplo, em cuja fusão é indispensável o emprêgo de escórias para tal finalidade. Outras escórias podem apresentar múltiplas outras finalidades, como: ação escorificante de óxidos e de inclusões, ação desgaseificante, ação afinadora de grana, etc.

5. VISCOSIDADE DOS METAIS LÍQUIDOS

A velocidade com que um líquido flui através de um conduto, para determinadas condições de temperatura, pressão, forma e dimensões do canal, é controlada pela sua viscosidade ⁴.

Qualitativamente, a viscosidade é aquela propriedade que nos permite dizer que, na temperatura ambiente, o mel (ou melado) é mais viscoso que a água. Quantitativamente a viscosidade é definida do seguinte modo (fig. 2):

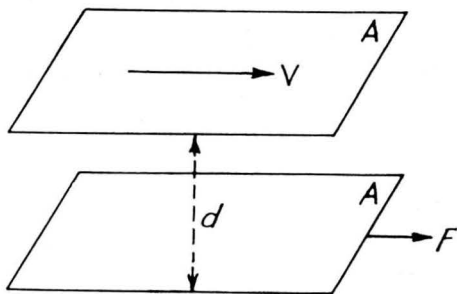


Fig. 2 — Definição quantitativa da viscosidade

$$F = \frac{V}{d} \eta$$

- Consideremos dois planos de área A, separados por uma pequena distância d, mergulhados em um líquido. Se um dos planos tem, em relação ao outro, uma velocidade relativa V, a componente F (isto é, a força F) que o líquido exerce sobre o outro plano, é dada pela expressão:

$$F = A \frac{V}{d} \eta$$

onde η é a viscosidade do líquido. Esta grandeza é, geralmente expressa em unidade C.G.S. denominada "poise" (homenagem ao físico belga Poiseuille) e tendo as dimensões (M)/(L)(T).

Para certas finalidades é, por vêzes, conveniente utilizar uma grandeza derivada, denominada "viscosidade cinemática", de que se obtém dividindo-se a viscosidade pela densidade do líquido.

Na Tabela 3, encontram-se os valores da viscosidade de alguns líquidos, determinados por Andrade ⁹:

TABELA 3

Substância	(poise)
Água (à temperatura ambiente)	0,0105
Mercúrio (logo acima do p. de fusão)	0,021
Chumbo (logo acima do p. de fusão)	0,028
Estanho (logo acima do p. de fusão)	0,020
Cobre (logo acima do p. de fusão)	0,038
Ferro (logo acima do p. de fusão)	0,040

Andrade concluiu que a viscosidade dos metais é apenas um pequeno múltiplo da viscosidade da água, e que a *viscosidade cinemática* (ou viscosidade dividida pela densidade) é consideravelmente menor que a da água.

Na fundição de metais não se considera propriamente a viscosidade, mas a fluidez. Esta, antigamente considerada como o inverso da viscosidade, não depende apenas desta, mas também de outros fatores, como veremos mais adiante.

6. TENSÃO SUPERFICIAL

Assim como os outros líquidos, os metais fundidos possuem a propriedade de tensão superficial. Os átomos do metal líquido exercem forças atrativas uns sobre os outros e, na superfície, estas forças não são balanceadas, produzindo um estado de tensão.

Dêsse modo, a tensão superficial de metais fundidos é caracterizada por forças agindo perpendicularmente à superfície. As manifestações usuais da tensão superficial em líquidos, inclui o conhecido fenômeno de ascensão ou depressão da superfície em tubos finos, a formação de glóbulos arredondados, o fenômeno de molhamento ou de não molhamento das superfícies, pelo líquido que se encontra em contacto com elas, etc.

A subida do aço líquido, em um fino canal, é impedida pela sua tensão superficial. Este efeito torna-se menos acentuado à medida que aumenta o diâmetro do canal. Pelo mesmo fenômeno de tensão superficial, quando metais líquidos são vazados em moldes de areia, a superfície do molde não é molhada.

Bircumshaw¹⁰ tabelou valores de tensões superficiais de alguns dos metais mais comuns, a temperaturas não muito superiores a seus pontos de fusão (Tabela 4):

TABELA 4

Tensão superficial de alguns metais comuns

Metal	Temperatura (°C)	Tensão superf. (dines/cm)
Antimônio	640	350
Bismuto	269	378
Chumbo	327	452
Mercúrio	20	465
Estanho	232	526
Cádmio	320	630
Zinco	419	758
Prata	998	923
Cobre	1.131	1.103
Ouro	1.120	1.128
Ferro (com 2,2% C)	1.420	1.500
Ferro (com 3,9% C)	1.300	1.150

A tabela acima permite tirar as seguintes conclusões:

- a) A tensão superficial dos metais geralmente cresce com o seu ponto de fusão.
- b) Quanto mais alto o teor de carbono de ferro, menor a sua tensão superficial. Donde se pode concluir que o aço possui tensão superficial maior que o ferro fundido, o que é plenamente verificado na prática.
- c) Como a tensão superficial da água, a 20°C, é somente de 81 dines/cm, vê-se que as tensões superficiais dos metais líquidos são relativamente altas.

Tem sido verificado, para um dado metal, mantidas as demais condições, que a tensão superficial diminui com a temperatura. Esta observação tem sido verificada para quase todos os metais. Exemplo: caso do estanho (fig. 3).

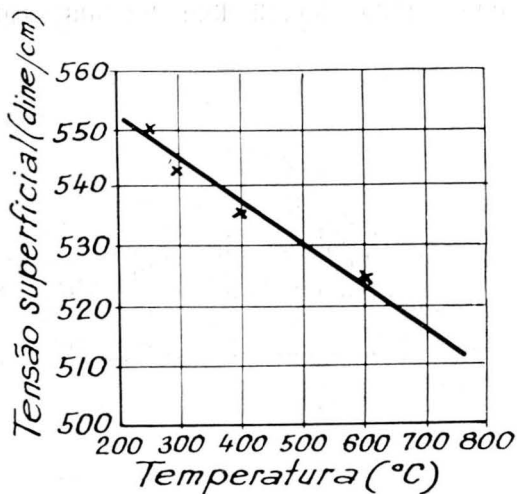


Fig. 3 — Variação da tensão superficial do Sn com a temperatura, segundo referência 4.

O cádmio, no entanto, constitui uma exceção a esta regra. Segundo Bircumshaw, aparentemente o cádmio líquido é o único metal cuja tensão superficial aumenta com a temperatura. É o que nos mostra a figura 4, para temperaturas crescentes até cerca de 400°C.

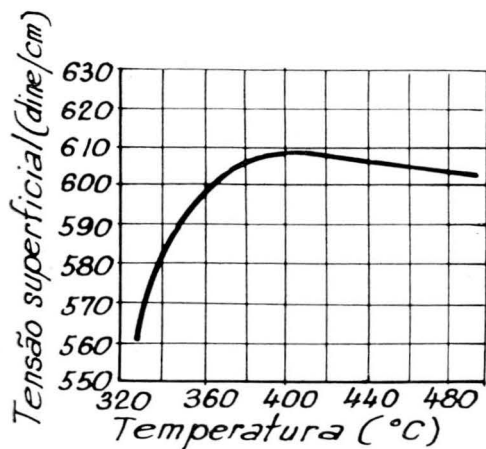
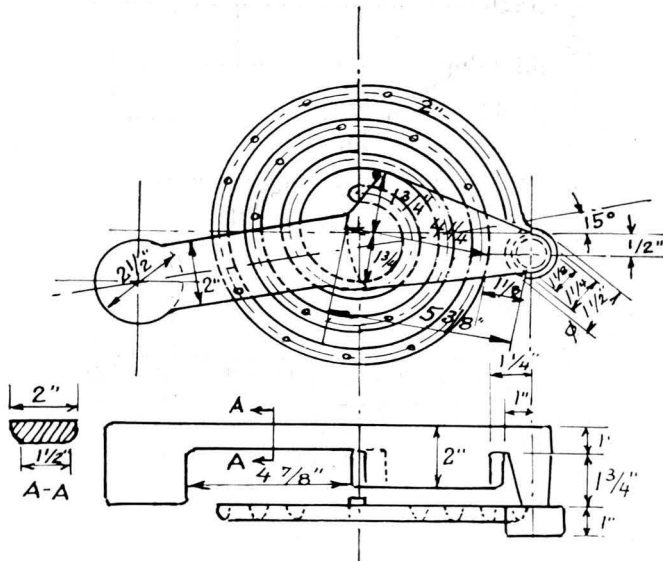


Fig. 4 — Variação da tensão superficial do Cd com a temperatura, segundo referência 4.

Depois de termos analisado os conceitos de “viscosidade” e de “tensão superficial” dos metais líquidos, estamos em condições de definir e compreender o que vem a ser “fluidez” dos metais líquidos.



Corpo de prova padrão para o ensaio de fluidez

Fig. 5 — Corpo de prova padrão para o ensaio de fluidez.

7. FLUIDEZ DOS METAIS LÍQUIDOS

O termo *fluidez* (“fluidity”) refere-se à propriedade de um metal líquido de poder fluir de forma livre e regular em um molde e de poder enchê-lo totalmente antes que se inicie a ação obstaculizadora da solidificação¹¹. Esta propriedade tem recebido outros nomes na literatura metalúrgica de língua inglesa, tais como: “castability”, “runnability”, “flowing power”, “fluid life”. No passado o termo fluidez (“fluidity”) referia-se a uma grandeza física específica, qual seja, o inverso da viscosidade, ou melhor, do “coeficiente de viscosidade”. Na literatura moderna prefere-se chamar o inverso da viscosidade de “coefficient of liquidity” (coeficiente de liquidez).

No seu sentido mais geral, “fluidez” não deve ser identificada com “viscosidade”. De fato, a fluidez de um metal, como anteriormente definida, depende de duas ordens mais importantes de fatores, a saber:

- De variáveis que decorrem do metal;
- De variáveis do ensaio, que decorrem do molde.

As principais variáveis que se relacionam com o metal, ou liga, além de sua composição química, são: viscosidade, tensão superficial, filmes superficiais de óxidos, teor de gás dissolvido, inclusões em suspensão e temperatura de vazamento.

As variáveis de ensaio incluem: a forma do corpo de prova utilizado no ensaio de fluidez; a forma e dimensões da bacia de vazamento; o material de que é feito o molde (seu poder de extrair calor); a velocidade de vazamento e o grau de aquecimento do molde.

A viscosidade e a tensão superficial já foram examinadas. As demais variáveis serão passadas em revista.

Filmes de óxidos superficiais — Tem sido verificado que filmes de óxidos superficiais afetam a fluidez, principalmente de ligas não-ferrosas. Em um estudo feito em lingotes de latão foi verificado¹¹ que a oxidação da liga, durante o vazamento em contacto com o ar, cria um filme superficial de óxido de zinco, o qual aumenta a aparente tensão superficial do metal, dificultando a sua vazão, além de ser causa inevitável de defeitos nos lingotes. No caso das ligas de alumínio, cujo filme de alumina (Al_2O_3) é muito resistente, este efeito pode ser bem observado. Nos bronzes de alumínio (ligas de cobre contendo de 5% a 10% de alumínio) também.

Teor de gás — Ao se estudar a vazão de um metal por um canal, assim como o efeito da tensão superficial sobre esta vazão, uma das dificuldades está no fato de que o metal, frequentemente, não se encontra em contacto com o molde, mas é dele separado por um filme de gás. Este gás ou é gerado no próprio molde, ou no metal, ou nas duas coisas ao mesmo tempo. Os gases emanados do molde, que envolvem o metal durante o vazamento, provavelmente devem aumentar a resistência à vazão, ou seja, dificultam o enchimento do molde. Por outro lado, é bem provável que os gases emanados do metal tendam a quebrar os filmes de óxido, ou a prevenir a formação deles, aumentando assim a fluidez.

Inclusões em suspensão — Matéria sólida em suspensão causa uma subida rápida da aparente viscosidade do líquido, prejudicando a sua vazão.

Forma do corpo de prova — Dentre as “variáveis do ensaio”, a forma do corpo de prova é a primeira a ser considerada. Ela tem influência decisiva sobre os resultados da fluidez.

Por isso procura-se estandarizar o corpo de prova a ser utilizado, em todos os seus detalhes: forma e dimensões da bacia de vazamento; forma e dimensões do corpo de prova; etc.

Quanto ao corpo de prova, a forma mais utilizada é a de uma espiral, como a da figura 5. Neste corpo de prova encontra-se padronizado também o "sistema de canais", isto é, o canal de vazamento, a bacia de alimentação, o canal de descida e o canal de entrada (ou de ataque) que devem ser desenhados de modo que o metal entre sempre sob pressão constante.

O vazamento deve ser feito de modo a manter cheia a bacia de alimentação, de maneira a se evitar turbilhões e descontinuidade no vazamento. Uma das partes essenciais do molde é a bacia de vazamento, cuja altura influi diretamente sobre o comprimento da espiral, mantidas as demais condições.

Propriedade do molde — O tipo de molde tem influência direta sobre a fluidez, conforme êle seja metálico, de grafita ou de areia. Em princípio, o molde da espiral deve ser da mesma natureza dos moldes empregados na fundição considerada. No entanto, para que se possam obter dados comparáveis, para todos metais e ligas, o molde da espiral deve ser sempre da mesma qualidade que é, geralmente, de areia para machos (estufado). É preciso, no entanto, controlar as diversas características da areia, tais como: módulo de finura, permeabilidade, pintura do molde, etc.

Temperatura do metal — O superaquecimento do metal aumenta o comprimento da espiral. Isto não significa, necessariamente, que a tensão superficial tenha diminuído, mas que, havendo mais alta temperatura, o metal pode fluir mais tempo, ao longo da espiral, antes de se solidificar.

Embora se tenham feito inúmeras tentativas para encontrar uma expressão matemática que permita determinar a fluidez de um metal¹², a nenhum resultado positivo se chegou. A determinação da fluidez dos metais líquidos continua a ser medida por métodos empíricos, como o descrito, onde tôdas as variáveis do ensaio devem ser estandardizadas.

Quando a fluidez é alta, o metal tende a espessar tôdas as formas do molde, em seus mínimos detalhes, podendo mesmo provocar o conhecido fenômeno de "penetração". Ao contrário, quando a fluidez é baixa, o metal torna-se menos capaz de reproduzir os detalhes do molde.

A composição química também participa de modo decisivo nos resultados da fluidez. Em particular, existem elementos que são capazes de aumentá-la apreciavelmente. É o caso, por exemplo, do fósforo adicionado ao ferro fundido ou aos bronzes, que, em baixos teores, já provoca aumento apreciável de fluidez destes metais.

Tensão superficial \times *qualidade superficial* — Dentre as propriedades físicas dos metais, a que mais afeta a sua fluidez é a da tensão superficial. Para um dado molde, a qualidade superficial da peça fundida, vai depender diretamente de sua tensão superficial. As experiências demonstraram que a altura do metal que pode permanecer sobre um molde de areia, sem penetração nos poros capilares, é diretamente proporcional à tensão superficial e inversamente proporcional à densidade do metal e ao raio efetivo dos poros. Isto significa que os metais de alto pêso atômico (e, portanto, de alta densidade), quando moldados em areia, exigem o uso de areia fina, para que se possa obter bom acabamento superficial¹³.

8. CONCLUSÕES

Analisando as principais propriedades dos metais líquidos, que interessam à técnica de fundição, procurou o autor mostrar que a prova prática de fluidez, tão utilizada pelos fundidores, não é uma propriedade isolada, simples, do metal que está sendo considerado, mas depende de um grande número de variáveis que decorrem do próprio metal e das condições de ensaio. Ao mesmo tempo, com a apresentação deste trabalho, procura o Autor promover debates sobre um assunto que considera do maior interesse para o desenvolvimento da técnica de fundição.

BIBLIOGRAFIA

1. Ponto 27 de Princípios Básicos da Metalurgia: *“Solubilidade dos gases nos metais sólidos e líquidos. Efeitos dos gases dissolvidos sobre as propriedades dos metais sólidos. Evolução durante a solidificação e o resfriamento. Fundamentos dos processos de eliminação dos gases dissolvidos nos metais”* — Pelo Prof. Eng. CLOVIS BRADASCHIA.
2. Ponto 28 de Princípios Básicos da Metalurgia: *“Oxidação. Velocidades de oxidação. Fatores que atuam nos processos de oxidação. Mecanismo da condutibilidade elétrica em condutores iônicos e semicondutores. Classificação dos semi-condutores. Teoria de Wagner da oxidação parabólica. Filmes delgados. Formação de camadas múltiplas. Oxidação das ligas. Oxidação interna”* — Pelo Prof. Eng. ALBERTO A. ARANTES.
3. Princípios Básicos da Metalurgia: Primeiro curso de uma série patrocinada pela ABM, com a colaboração de outras entidades. Dirigido pelo Prof. Dr. LUIZ C. CORRÊA DA SILVA.
4. MURPHY, A. J. — *“Non-ferrous Foundry Metallurgy”*. Ed. Pergamon Press Ltd. (1954).
5. VON ZEERLEDER, A. — *“Technology of Lightmetals”*.
6. Metals Handbook, 1961, 8.ª edição, vol. 1. Editado pela “American Society for Metals” (ASM).

7. KUBASCHWSKI, Evans — “*Metallurgical, Thermochemistry*”, pág. 326 e segs. Ed. Pergamon (1958).
8. Ponto 30 de Princípios Básicos da Metalurgia: “*Reações entre metais líquidos e líquidos não-metálicos (escória). Fatores que governam o equilíbrio e a velocidade da reação. Etc.*” — Pelo Prof. Dr. LUIZ C. CORRÊA DA SILVA.
9. ANDRADE, E. N. da C. — “*A Theory of the Viscosity of Liquids*”. Phil. Mag., 17, 497 (1934), apud Metals Handbook, ed. 1948, pág. 199.
10. BIRCUMSHAW, L. — “*The Surface Tension of Liquid Metals*”. Phil. Mag., 17, 181 (1934), apud Metals Handbook, ed. 1948, pág. 200.
11. METALS HANDBOOK, ed. 1948, pág. 199 (“Fluidity of Metals”, por Charles W. Briggs).
12. KRYNITSKY, A. I. — “*Progress Made in Fluidity Testing of Molten Metals During the Last Ten Years*”. Trans. da A. F. S., vol. 61, 1953, pág. 399.
13. HOAR-ATTERTON — apud ref. (4), pág. 43.