

TÉCNICAS METALÚRGICAS DE ELABORAÇÃO DE LIGAS E FUNDIÇÃO

*Luís Eduardo Arruda**

ARRUDA, L.E. Técnicas metalúrgicas de elaboração de ligas e fundição. *Rev. do Museu de Arqueologia e Etnologia*, São Paulo, Suplemento 2: 27-40, 1997.

RESUMO: Neste trabalho será apresentada uma visão geral da técnica de fundição de metais e da sua evolução em seus pontos básicos. Os dois metais mais importantes para a Arqueologia, o cobre e o ferro, terão seus desenvolvimentos abordados e as peças fundidas no passado, assim como amostras de escória, analisados por outros trabalhos, serão comparados com as propriedades, especialmente de composição química, encontradas nos fundidos atualmente produzidos.

UNITERMOS: Ligas — Fundição de metais — Metalurgia antiga.

Introdução

Antes de abordarmos as origens da técnica de fundição de metais, vamos apresentar os elementos básicos desta tecnologia. Dentre as regiões do mundo onde a fundição se desenvolveu, será dado especial destaque ao antigo Egito, apesar de não ter sido aí o primeiro lugar onde foram fundidas peças metálicas, mas devido ao fato de haver grande quantidade de trabalhos realizados sobre a metalurgia egípcia.

Apenas a fundição do cobre e do ferro, e de suas ligas, serão discutidas neste trabalho, por serem os dois metais mais utilizados em fundição no passado.

O processo de fundição de metais

O esquema do fluxograma genérico do processo de fundição de metais é mostrado na Fig. 1, sendo que abaixo há uma descrição de cada subdivisão ou operação:

— confecção dos moldes (moldagem): utilizando-se materiais suficientemente resistentes à

temperatura e às solicitações mecânicas e químicas, um negativo da peça a ser fundida deve ser feito a partir de um modelo. Nesta operação devemos também instalar os machos da peça (se existirem), os quais já devem ter sido feitos anteriormente, de forma que o molde esteja fechado e pronto para receber o metal líquido;

— confecção dos machos: machos são insertos para formar as partes internas dos fundidos. Eles são usados todas as vezes que a operação de moldagem enfrente uma contra-saída entre molde e modelo;

— fusão: consiste na elaboração do metal ou liga a ser vazado;

— vazamento: é o enchimento do molde com metal líquido;

— desmoldagem: após o resfriamento, a peça deve ser extraída do molde;

— limpeza: os restos de moldes e machos na superfície da peça devem ser retirados;

— acabamento: rebarbas devem ser cortadas, cavidades podem ser cobertas com solda.

Evolução da técnica de fusão dos metais

As descobertas arqueológicas mais recentes permitem afirmar que a primeira região onde o ho-

(*) SOFUNGE, São Paulo.

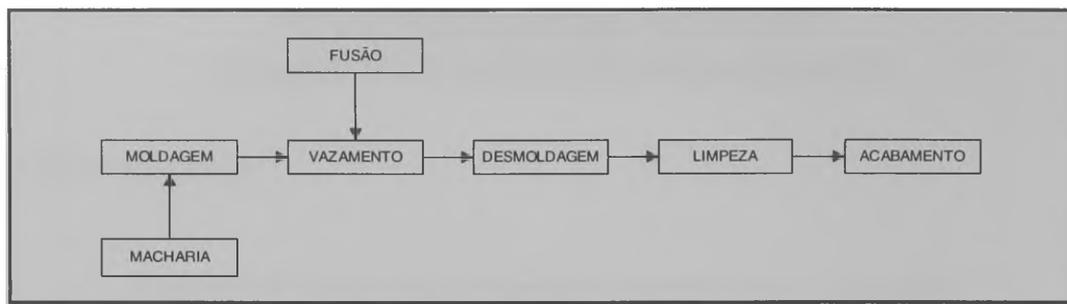


Fig. 1 — Fluxograma do processo de fundição

mem produziu peças fundidas em cobre foi o Oriente Médio, nos territórios hoje pertencentes à Turquia e ao Irã. Apenas posteriormente a fundição chegou ao vale do Nilo. A Fig. 2 mostra os primeiros núcleos urbanos e metalúrgicos no Oriente Próximo. O problema tecnológico mais complexo para se executar a fusão de um metal ou liga, considerando-se que os elementos já estejam quimicamente reduzidos, é a temperatura de fusão, pois o vazamento do metal só pode ser realizado se esta estiver suplantada em 5 a 10 %, caso contrário o líquido não terá suficiente fluidez para preencher o molde. Analisaremos agora a evolução da fundi-



Fig. 2 — Os primeiros núcleos urbanos e metalúrgicos no Oriente Próximo.

ção do cobre e suas ligas para posteriormente abordarmos o ferro.

Evolução da fundição do cobre e suas ligas

O cobre foi o primeiro metal a ser fundido em larga escala pelo Homem. Isso se deve ao fato deste metal ser encontrado com relativa abundância na crosta terrestre, além do fato de ser facilmente reduzido à forma metálica e de possuir um ponto de fusão baixo (1083 °C).

A Fig. 3 mostra um esquema de um forno primitivo para redução e fusão do cobre. Depois de muitas horas ou mesmo dias, a fogueira se apagava e pequenas “gotas” de cobre, juntamente com escória, ficavam no fundo do forno. Posteriormente estes tinham que ser separados mecanicamente e as gotas de cobre recolhidas para uma nova fusão. As temperaturas alcançadas nestes fornos eram insuficientes para se proceder o vazamento do metal.

Isto só foi conseguido quando a fusão foi realizada com o auxílio do sopro pulmonar com um canudo ou com o uso de um fole. Um forno com um fole é mostrado na Fig. 4. Esta prática representou uma verdadeira revolução tecnológica na metalurgia. Nas figuras 5 e 6 vemos afrescos egípcios da VIa. Dinastia (2407-2260 a.C.) mostrando operações de fusão sem o uso do fole.

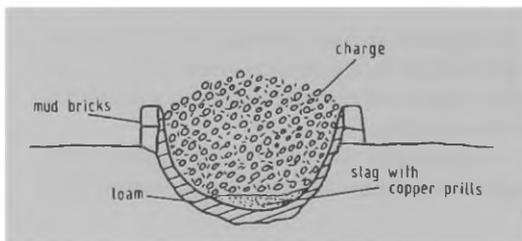


Fig. 3 — Forno primitivo de redução e fusão.

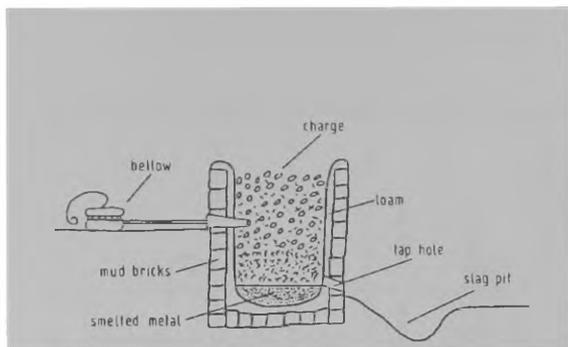


Fig. 4 — Forno com fole para redução e fusão de metal a partir de seus minérios.

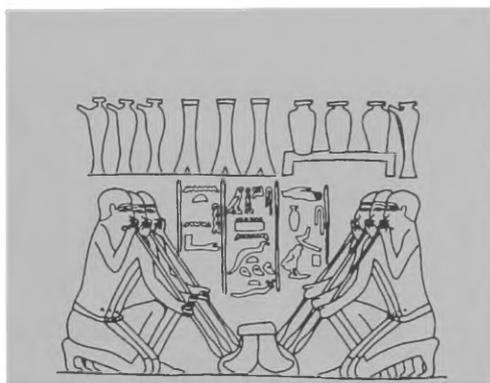


Fig. 5 — Afresco da mastaba do Vizir Mereruka, em Sakara, com seis fundidores assoprando dois cadinhos no fogo. Os hieróglifos dizem: "Este é um cadinho novo, venham para o lado dele e assprem, colegas." VIª Dinastia, 2407-2260 a.C.



Fig. 6 — Fundidores assopram um cadinho no fogo na parte inferior de uma parede. Tumba do Vizir Pepiankh, VIª Dinastia, 2407-2260 a.C.

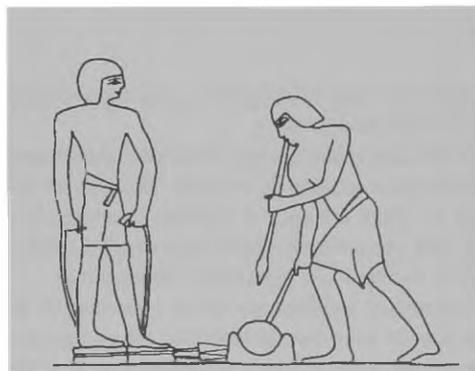


Fig. 7 — A fusão de maiores quantidades de metal só foi possível com a utilização de foles para assoprar o fogo. Afresco da tumba do príncipe Puyemre, Tebas, XVIIIª Dinastia, 1570-1213 a.C.

Na Fig. 7 já encontramos este aparelho numa representação da XVIIIª. Dinastia (1570-1213 a.C.). Portanto, pelo menos no Egito, parece que a introdução do fole à fusão do cobre levou muitos séculos.

A Fig. 8 mostra um afresco de uma oficina egípcia de fundição com ilustrações das etapas do processo produtivo.

A Tabela I mostra as composições típicas das ligas de cobre mais utilizadas, o bronze e o latão:

Liga	Elementos (%)		
	Cu	Zn	Sn
Bronze	85	0	15
Zinco	70	30	0

Tabela I — Composições químicas típicas do bronze e latão.

Na Tabela II encontramos uma relação de objetos de cobre do antigo Egito assim como as suas composições químicas. Podemos notar que na maioria dos casos o teor de cobre se aproxima dos 100 %, o que indica que a tecnologia de mineração e concentração do minério, redução, elaboração e vazamento do metal já se encontrava num estágio evoluído.

Na Tabela III temos outras peças egípcias de cobre, sendo que o teor deste elemento também se aproxima de 100 % na maioria dos casos.

Na Tabela IV estão apresentados vários objetos egípcios confeccionados com bronze. Também neste caso existe uma certa regularidade na composição química, sendo que os teores de cobre e estanho não apresentam uma grande dispersão. Da mesma forma que nas Tabelas II e III, esta observa-



Fig. 8 — Pintura na parede da tumba do Vizir Rekhmire, em Tebas. Nessa fundição há quatro fornos, com vários foles, para fundir uma grande quantidade de metal, provavelmente bronze ligado com Pb e Sn.

ção pode ser uma indicação do grau de evolução do processo produtivo.

O trabalho realizado por Hans-Gert Bachmann sobre técnicas antigas de redução de cobre no deserto do Sinai e Negev é bastante interessante e mais uma vez usaremos seus dados para avaliar o nível de evolução da metalurgia destes povos.

A partir de análises químicas e estruturais de amostras de escórias de diversos sítios faremos uma comparação destes resultados quanto à sua dispersão e proximidade dos materiais utilizados no presente

A Tabela V traz os resultados da escória de vazamento do tipo Fayalita, enquanto que na Fig. 9 os seus valores de composição química estão plotados num diagrama ternário Anortita-SiO₂-FeO. Notamos facilmente que as posições das escórias analisadas estão concentradas numa região delimitada.

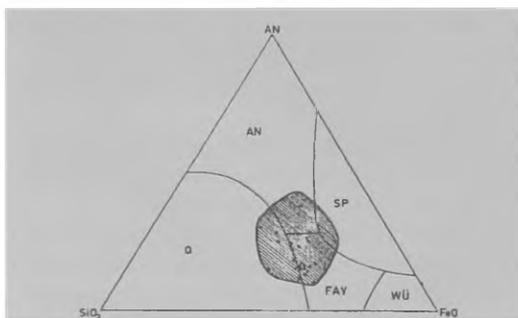


Fig. 9 — Posição de escórias do vazamento, do tipo Fayalita, no sistema ternário: Anortita - SiO₂ - FeO.

A Tabela VI traz os dados analíticos de escória do tipo Knebelita. Na Fig. 10 estes resultados também estão plotados num diagrama ternário Anortita-SiO₂-FeO. Também neste caso

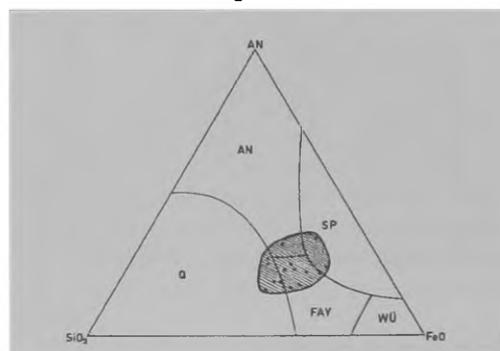


Fig. 10 — Posição de escórias do vazamento, do tipo Knebelita, no sistema ternário: Anortita - SiO₂ - FeO.

notamos a concentração dos pontos numa região específica.

A conclusão do trabalho é que os antigos fundidores utilizavam materiais adicionados à fusão para proteger o banho metálico da oxidação. Estes materiais são denominados fluxos ou escorificantes.

No texto a seguir a técnica moderna de elaboração de cobre e suas ligas está descrita. Podemos notar semelhanças de composição química entre as escórias do trabalho de Bachmann e os escorificantes recomendados.

Nº	Objeto	Cobre	Ferro	Estanho	Chumbo	Níquel, Cobalto	Arsênio	Antimônio	Bismuto	Enxofre	Manganês	Não determinado	Total
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	Machados	97,4	0,2	tr.	0,2	1,3	0,5	tr.	—	—	0,1	0,3	100,0
2	Bracelete	77,6	0,2	—	0,1	0,1	tr.	—	—	—	—	22,0	100,0
3	Ferramenta	98,5	tr.	—	tr.	1,2	pres.	—	tr.	—	—	0,3	100,0
4	Adaga	99,5	0,1	nil	tr.	nil	0,4	—	nil	—	—	—	100,0
5	Molde de faca	99,6	0,2	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
6	Cinzel	93,2	tr.	tr.	0,1	—	0,1	tr.	nil	—	—	—	100,0
7	Enxó	99,6	tr.	nil	—	—	0,4	tr.	—	tr.	—	—	100,0
8	Enxó	99,5	tr.	nil	—	—	0,5	tr.	—	tr.	—	—	100,0
9	Picareta	100,0	—	tr.	—	—	pres.	—	—	—	—	—	100,0
10	Gancho	99,5	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
11	Amuleto	77,0	6,5	—	—	—	tr.	—	—	—	—	14,5	100,0
12	Cano	96,5	0,2	—	—	—	tr.	—	—	—	—	3,4	100,0
13	Molde de ferramenta	98,4	0,2	nil	tr.	—	0,3	tr.	tr.	—	—	1,1	100,0
14	Estátua	98,2	0,7	—	—	1,1	—	—	—	tr.	—	—	100,0
15	Folha	94,8	—	1,1	—	—	tr.	—	—	—	—	4,1	100,0
16	Machado	93,3	0,2	0,5	—	—	3,9	0,2	—	—	—	1,9	100,0
17	Tira	95,0	0,3	tr.	0,3	0,1	4,2	—	tr.	—	—	0,1	100,0
18	Folha	87,7	—	tr.	—	—	—	—	—	—	—	12,3	100,0
19	Machado	88,9	—	0,2	0,6	—	5,6	0,7	—	—	—	4,0	100,0
20	Lingote	93,0	5,9	—	—	—	0,1	—	—	1,0	—	—	100,0
21	Machado	96,9	0,7	0,2	—	tr.	1,5	—	—	tr.	—	0,7	100,0
22	Espelho	90,8	tr.	0,1	tr.	—	6,4	—	—	—	—	2,7	100,0
23	Faca	96,7	1,2	tr.	0,6	0,3	0,8	—	0,4	—	—	—	100,0
24	Molde de enxó	98,4	0,5	—	—	0,3	tr.	—	—	—	—	0,8	100,0
25	Molde de enxada	97,6	0,3	tr.	—	0,2	tr.	—	—	tr.	—	0,6	100,0
26	Molde de jugo	96,8	0,1	1,3	—	0,3	tr.	—	—	0,3	—	0,7	100,0
27	Faca	97,1	—	1,8	—	—	2,3	—	—	—	—	—	100,0

Tabela II — Objetos egípcios antigos em cobre.

Fusão de ligas de cobre

Preparação dos materiais da carga

A operação de fusão, de qualquer metal exige sempre os mesmos princípios:

- eliminar todas as contaminações que possam estar presentes na carga do fusão (presença de elementos químicos deletérios que comprometam a qualidade da peça fundida);
- os materiais da carga deverão estar o mais limpos possível, isentos de graxas, óleos, oxidação, areia, etc.

— a ausência de umidade nas matérias-primas da fusão é desejável.

Os metais que são utilizados na elaboração das ligas de cobre sofrem perdas no processo de fusão, sendo que esta perda, em termos médios é:

Cu	1	1,5%
Al	2	3%
Zn	2	5%
Pb	1	2%
Si	4	8%
Mn	2	3%
Sn		1,5%
Ni		1,2%
Bi	10	15%

Nº	Objeto	Cobre	Ferro	Zinco	Arsênio	Estanho	Prata, Bismuto	Níquel	Chumbo	Enxofre	Areia	Não determinado	Total
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	Machado	98,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,0	100,0
2	Machado	98,1	—	0,3	tr.	—	—	—	—	—	—	1,6	100,0
3	Machado	100,0	tr.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100,0
4	Machado	99,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,4	100,0
5	Machado	97,2	—	0,3	—	—	—	tr.	—	—	—	2,5	100,0
6	Machado	99,0	—	—	—	—	tr.	—	—	—	—	1,0	100,0
7	Machado	98,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,7	100,0
8	Enxó	99,9	tr.	tr.	—	—	tr.	—	—	—	—	0,1	100,0
9	Enxó	97,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,4	100,0
10	Enxó	97,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,3	100,0
11	Enxó	99,6	—	—	—	—	tr.	—	—	—	—	0,4	100,0
12	Enxó	97,0	—	—	—	—	—	0,4	—	0,3	—	1,8	100,0
13	Enxó	94,2	—	—	—	—	—	—	—	—	0,4	2,9	100,0
14	Cinzel	98,7	—	—	—	—	tr.	—	—	—	—	1,3	100,0
15	Cinzel	98,0	tr.	tr.	0,3	—	tr.	—	—	—	—	1,7	100,0
16	Cinzel	98,8	0,2	0,2	—	—	tr.	—	—	—	—	0,4	100,0
17	Faca	98,5	0,3	0,3	0,6	—	—	—	—	—	—	0,6	100,0
18	Barra	98,1	—	—	0,2	—	—	—	—	—	—	1,7	100,0
19	Barra	88,0	—	—	—	—	—	—	—	—	8,0	3,9	100,0
20	Cinzel	97,7	tr.	tr.	—	—	—	—	—	—	—	1,8	100,0
21	Enxó	98,0	tr.	tr.	tr.	—	—	—	tr.	—	—	2,0	100,0
22	Cinzel	97,6	—	—	—	—	—	—	—	—	1,4	—	100,0
23	Cinzel	98,5	—	—	—	—	—	—	—	—	0,3	1,2	100,0
24	Enxó	8,0	—	—	—	—	—	—	—	—	20,0	—	100,0

Tabela III — Objetos egípcios antigos em cobre.

A perda apontada acima deve ser considerada no cálculo da carga da fusão.

Fusão de bronzes de estanho

Antes de começar a fusão, o forno deve ser minuciosamente limpo de escória resíduos de metal. Aquece-se o revestimento do forno até 600-700 °C. Se houver impurezas nocivas no forno (cadinho) deve-se promover uma fusão de lavagem.

Inicialmente carrega-se o forno de cobre. Se o níquel fizer parte da liga este deve ser introduzido junto com o cobre. Durante a fusão da carga ocorre a oxidação do cobre e se cria uma superfície de CuO. Os outros elementos da carga também se oxidam. Portanto, depois da fusão, o banho metálico está recoberto por uma capa de escória rica em CuO, pois a densidade destes óxi-

dos é inferior à dos metais líquidos. Sobre o metal fundido deve-se aplicar uma camada de carvão vegetal para proteger o metal da oxidação.

Um meio mais eficaz contra a oxidação do metal durante a fusão é a utilização de um fundente líquido. Para a fusão de bronzes de estanho em fornos de revestimento de chamote se utilizam os fundentes seguintes:

Composto	Tipo I	Tipo II
SiO ₂	41 - 47%	50%
MnO	25 - 32%	—
Al ₂ O ₃	11 - 14%	—
Na ₂ O	10 - 15%	—
Na ₂ B ₂ O ₇	—	30%
CaO	—	20%

Nº	Objeto	Cobre	Estanho	Chumbo	Antimônio	Arsênio	Níquel	Ferro	Zinco	Enxofre	Não determinado	Total
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	Bastão	89,8	9,1	—	—	0,5	—	tr.	—	tr.	0,6	100,0
2	Lâmina	88,5	8,5	0,3	—	—	tr.	1,8	—	—	0,9	100,0
3	Figurinha	91,5	6,3	—	—	—	—	—	—	—	1,8	100,0
4	Figurinha	88,4	11,9	—	—	—	—	—	—	—	—	100,3
5	Tigela	85,8	3,5	8,5	—	—	—	0,2	—	—	2,0	100,0
6	Machado	85,9	12,1	0,8	—	—	—	—	—	—	1,2	100,0
7	Cinzel	93,6	7,4	—	tr.	0,5	—	—	—	—	—	100,5
8	Cinzel	96,4	2,2	—	—	0,4	—	—	—	—	1,0	100,0
9	Prego	94,8	4,6	0,3	—	—	—	0,4	—	—	—	100,1
10	Enxó	89,8	3,1	—	tr.	0,3	—	—	0,4	—	6,4	100,0
11	Cinzel	88,0	12,0	0,1	tr.	0,4	—	—	0,3	—	—	100,8
12	Machado	89,6	6,7	—	tr.	1,0	—	0,5	—	—	2,2	100,0
13	Machado	90,1	7,3	—	tr.	0,2	—	—	—	tr.	2,4	100,0
14	Machado	90,2	9,5	—	—	tr.	0,1	pres.	—	pres.	0,2	100,0
15	Enxó	67,6	9,6	—	—	—	0,6	tr.	—	—	22,2	100,0
16	Espada	89,9	8,0	tr.	—	0,6	0,2 ²	0,4	—	—	0,9	100,0
17	Faca	94,0	5,9	—	—	—	—	0,1	—	—	—	100,0
18	Vaso	88,3	8,9	2,3	—	—	—	0,5	—	—	—	100,0
19	Figueira	87,1	6,3 ³	4,4	—	—	—	tr.	—	—	2,2	100,0
20	Fragmento	92,0	6,5	0,8	—	—	—	0,3	—	—	0,4	100,0
21	Caranguejo	90,7	8,1	0,3	—	—	0,1 ²	0,2	—	0,1	0,5	100,0
22	Tigela	80,8	13,1	5,1	—	—	0,5 ²	0,3	—	—	0,2	100,0

Tabela IV — Objetos egípcios antigos em bronze.

O consumo de fundentes é de 2-2,5 % da massa de metal. Quando se funde bronzes em fornos de revestimento básico, são empregados fundentes compostos de bórax, $\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7$, uma mistura de 10-30% de areia de quartzo e bórax, uma mistura de 50% de soda calcinada (NaO) e 50% de espato flúor. As misturas com espato flúor são utilizadas se a fusão se realiza em cadinhos de grafite, pois estas misturas corroem o revestimento de chamote. A massa fundida é aquecida até 1200 °C e faz-se a desoxidação com 0,3-1% de fosfato de cobre.

Faz-se agora a introdução do Zn no forno, aquecido até 150 °C, agita-se o banho e faz-se então a adição do Sn, também pré-aquecido a 150 °C. Se o Pb fizer parte da composição da liga este deverá ser introduzido junto com o Sn. O banho deve ser aquecido até 1250-1280 °C para ser então executada a limpeza da escória e a retirada de uma prova para verificar a presença de óxidos e gases dissolvidos no metal. Se a peça a ser fundi-

da for muito fina pode-se adicionar 0,1-0,2% de fosfato de cobre.

Antes de passarmos para a abordagem da metalurgia do ferro, vale lembrar a interdependência dos parâmetros do processo de fundição que é mostrada na Fig. 11.

Fundição do ferro

A fundição do ferro começou a se desenvolver posteriormente ao cobre e suas ligas, devido ao fato do minério de ferro ser mais difícil de ser reduzido e, principalmente, ter um ponto de fusão mais alto, sendo que tais temperaturas raramente conseguiam ser atingidas pelos fornos da antiguidade. Sendo assim, o ferro era obtido na forma de ferro esponja e então forjado. Algumas exceções são estatuetas romanas encontradas em Sussex e peças chinesas, talvez devido ao fato do minério chinês ser rico em fósforo, que reduz o

Área	Sítio	Amostra	Cu	SiO ₂	FeO	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	S
Sinai ↓ T i m n a ↓	317	245	6,20	38,99	31,96	0,07	5,60	13,00	3,20	n.a.	n.a.	n.a.	1,30	n.a.
	317	246	0,80	38,83	33,01	0,30	15,94	1,80	4,34	n.a.	n.a.	n.a.	1,13	n.a.
	324	413	2,25	31,45	40,96	0,17	4,80	0,30	5,22	0,09	1,37	n.a.	0,17	n.a.
	385	119/1	1,16	35,48	33,51	11,09	6,66	1,01	6,61	0,63	1,02	~,1	1,07	n.a.
	385	119/2	1,66	38,36	36,21	0,37	11,57	1,71	4,18	0,36	0,84	n.a.	2,15	n.a.
	458	423	0,27	36,22	39,31	5,17	4,37	1,79	7,20	0,15	1,95	—	0,10	n.a.
	485	253/1	4,82	36,57	36,78	0,05	7,30	0,61	3,07	n.a.	n.a.	n.a.	1,84	n.a.
	485	253/2	2,40	45,63	28,01	0,11	9,80	0,40	3,74	n.a.	n.a.	n.a.	1,13	n.a.
	485	424/5	1,96	44,51	37,34	0,08	5,07	0,78	6,24	n.a.	n.a.	~,1	0,27	n.a.
	2	LR3	0,27	29,70	53,10	2,50	4,70	2,30	9,80	n.a.	1,97	n.a.	n.a.	0,20
	2	LR4	0,61	40,20	43,30	1,70	9,30	0,50	2,20	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,10
	2	LR5	2,30	35,70	32,90	2,70	13,70	4,70	3,10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,69
	2	LR6	3,80	32,50	46,20	0,40	2,30	3,10	2,90	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,14
	2	LR7	0,32	36,10	40,40	3,50	4,50	1,60	2,30	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,25
	2	LR8	0,28	34,20	36,50	7,60	5,20	1,40	9,60	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,17
	2	LR9	0,85	35,40	52,40	0,70	4,90	—	4,10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,30
	30	A	1,4	36,5	43,2	9,2	5,3	—	2,7	—	n.a.	1,0	0,5	—
	30	B	2,4	40,4	39,1	9,2	5,1	—	2,4	—	n.a.	0,8	0,3	—
	30	C	1,5	39,9	40,8	10,3	4,0	—	1,9	—	n.a.	0,8	0,3	—
	30	D	0,8	38,0	42,9	8,2	5,4	—	2,4	—	n.a.	0,8	0,7	—
	30	E	2,1	32,7	45,8	7,4	3,9	—	2,2	—	n.a.	0,7	0,5	—
	30	F	2,9	36,0	42,7	8,1	4,2	—	2,4	—	n.a.	0,7	0,5	—
	30	G	2,40	48,0	39,0	1,7	5,5	—	1,6	—	n.a.	0,3	—	—
	30	H	3,7	63,5	10,6	0,8	5,9	—	10,1	0,4	n.a.	0,8	0,1	0,1
	30	I	0,9	41,0	39,1	8,6	5,2	—	2,8	—	n.a.	0,7	0,3	—
	30	K	1,5	38,5	40,5	9,0	5,4	—	1,6	—	n.a.	1,0	0,2	—
	30	L	1,7	37,5	44,4	7,1	4,2	—	2,2	—	n.a.	0,7	0,4	—
	30	10	1,0	38,3	36,5	10,9	5,9	—	2,0	—	n.a.	0,8	0,5	—
	30	10	9,6	41,7	32,7	0,4	10,7	—	1,0	—	n.a.	0,3	—	—

Tabela V — Dados analíticos de escórias de Fayalita.

Zn	Pb	Referências	Sist.	AN	SiO ₂	FeO	Bas. No.	Vis. Coef.	Análise de fase/Observações
n.a.	n.a.		2	18	34	48	1.276	1,200	—
n.a.	n.a.		2	42	21	37	1.150	1,183	—
<1,0	—		2	25	26	49	1.198	1,301	FAY. HED
<0,1	—		2	28	24	48	1.205	1,281	KNE
n.a.	n.a.		2	35	24	41	1.141	1,200	—
<0,1	—		2	26	26	48	1.151	1,215	FAY
n.a.	n.a.		2	24	32	44	1.030	1,129	—
n.a.	n.a.		2	30	38	32	0,723	0,776	—
—	—		2	25	35	40	0,827	0,893	FAY, Q
n.a.	n.a.	Lupu e	2	25	18	57	1.549	1,585	—
n.a.	n.a.	Rothenberg	2	23	30	47	1.165	1,292	—
n.a.	n.a.	(1970)	2	38	22	40	1.197	1,278	—
n.a.	n.a.	“	2	10	32	58	1.416	1,514	—
n.a.	n.a.	“	2	15	33	52	1.233	1,341	—
n.a.	n.a.	“	2	28	24	48	1.127	1,162	—
n.a.	n.a.	“	2	17	28	55	1.368	1,504	—
0,1	0,1		2	16	30	54	1.302	1,472	FAY
0,1	0,1		2	15	35	50	1.099	1,248	FAY, MAG?
0,1	0,1		2	12	35	53	1.148	1,318	FAY, Q?
0,1	—		2	15	32	53	1.233	1,399	FAY
0,2	0,1		2	16	30	54	1.302	1,484	FAY, MAG
0,3	0,1		2	14	32	54	1.258	1,432	FAY, MAG, Q
0,1	0,1		2	15	43	42	0,816	0,931	FAY
0,1	0,2		2						Q, SP, FAY; revestimento de escória
0,1	0,1		2	16	35	49	1.068	1,208	FAY
0,1	0,1		2	17	32	51	1.235	1,406	FAY
0,1	0,1		2	13	33	54	1.228	1,403	FAY
0,1	—		2	16	33	51	1.167	1,323	FAY
0,2	0,3		2	28	34	38	0,925	1,026	HED, CUP FAY?

Área	Sítio	Amostra	Cu	SiO ₂	FeO	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	S
Sinai	344	214	1,06	42,29	22,65	14,32	6,14	0,60	5,29	0,66	0,53	<0,5	0,70	n.a.
	345	416	0,68	28,96	35,27	11,40	6,73	2,24	7,80	0,12	3,24	<0,5	—	n.a.
	347	417	1,85	33,55	19,33	14,01	12,98	3,91	5,72	0,13	2,07	<0,5	—	n.a.
	350	121/1	1,05	29,42	28,02	19,56	3,70	0,31	6,57	0,78	0,23	—	2,51	n.a.
	350	121/2	0,62	24,84	34,19	19,42	3,90	0,20	7,09	0,68	0,38	0,5	2,90	n.a.
	350	121/3	1,01	32,57	14,89	29,62	3,46	0,49	6,53	0,86	0,87	0,5	1,13	n.a.
	350	T3/L1	0,4	35,8	38,3	24,5	4,1	2,0	5,5	0,3	n.a.	0,4	1,1	0,2
	350	T3/L2	0,4	39,2	17,6	25,0	6,5	2,7	5,1	0,3	n.a.	0,4	1,0	0,3
	350	T3/L3	0,5	37,5	34,6	11,3	5,8	1,1	6,2	0,4	n.a.	0,3	1,1	0,3
	350	T3/L4	0,5	28,9	24,3	30,3	5,3	2,0	6,3	0,2	n.a.	0,4	1,2	0,2
T i m n a	354	122	1,25	36,18	18,18	25,83	5,64	1,71	6,34	0,67	0,46	0,5	1,21	n.a.
	354	418	1,95	37,70	10,77	27,50	5,04	1,36	7,65	0,19	3,67	0,5	0,26	n.a.
	2	LR1	0,24	32,70	14,80	32,30	4,10	2,50	4,80	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,20
	2	LR2	0,27	35,60	6,50	40,40	4,60	1,50	4,10	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,13
	30	2	0,4	42,4	3,9	32,5	8,9	—	3,8	0,6	n.a.	3,0	3,0	0,6
	30	20	4,0	40,7	9,0	33,3	6,7	—	2,5	0,1	n.a.	1,5	2,0	0,5
	30	25	0,5	44,5	6,1	36,5	5,4	—	2,9	—	n.a.	1,7	—	0,3
	30	26/G1	n.a.	40,0	14,0	n.a.	8,0	n.a.	9,0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	30	26/Cr	0,8	40,2	7,5	38,0	6,9	—	2,7	0,1	n.a.	2,2	3,0	0,5
	30	100	2,0	42,6	7,4	36,0	5,4	—	2,7	—	n.a.	1,6	—	0,2
A r a b a h	58	58C	0,73	30,11	30,35	29,33	12,17	0,98	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Tabela VI — Dados analíticos de escórias de Knebelita.

Zn	Pb	Referências	Sist.	AN	SiO ₂	FeO+MnO	Bas. No.	Vis. Coef.	Análise de fase/Observações
<1,0	<0,1		2	25	34	41	0,869	0,944	—
<0,5	—		2	34	15	51	1,576	1,605	TEP, KNE, SP
<0,5	—		2	44	15	41	1.350	1.335	TEP, SP
<1,0	—		2	22	24	54	1.356	1,462	KNE
<1,0	—		2	24	17	59	1.733	1,841	KNE
<1,0	—		2	23	27	50	1.190	1,284	KNE
0,1	—		2	18	28	54	1.331	1,433	—
0,1	—		2	23	30	47	1.115	1,176	—
—	—		2	23	28	49	1.132	1,217	—
<0,1	—		2	22	20	58	1.679	1,764	—
<0,5	—		2	25	27	48	1.166	1,234	FAY, KNE, JOH
<1,0	—		2	32	26	42	1.028	1,070	TEP, KNE
n.a.	n.a.	Lupu e	2	18	28	54	1.346	1,432	—
n.a.	n.a.	Rohenberg	2	17	31	52	1.241	1,350	—
—	—	(1970)	2	27	33	40	0,904	0,983	Escória vítrea
0,1	0,5		2	19	35	46	1,132	1,134	TEP, KNE
0,1	0,1		2	16	39	45	0,904	1,013	TEP + escória vítrea
n.a.	n.a.		—	—	—	—	—	—	escória vítrea; anal. incompl.
0,1	0,4	—	2	19	33	48	1,097	1,221	TEP, KNE
0,1	0,2		2	17	37	46	0,961	1,077	TEP, KNE
n.a.	n.a.		2	24	17	59	2,148	2,418	—

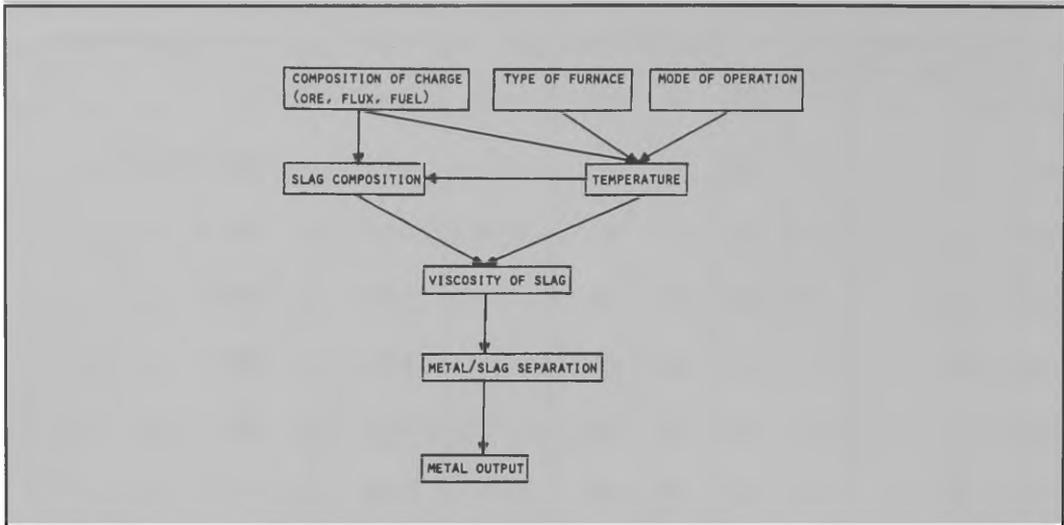


Fig. 11 — Interdependência dos parâmetros do processo.

ELEMENTO	FERROS ROMANOS (REGIÃO)			SOFUNGE Bloco Motor
	Warrington	Stratford	Hengistbury	
%C	3,23	3,52	3,49	3,35
%Si	1,05	1,92	0,38	1,90
%Mn	0,40	0,63	traços	0,60
%S	0,48	0,049	0,035	0,110
%P	0,76	0,765	0,180	0,045

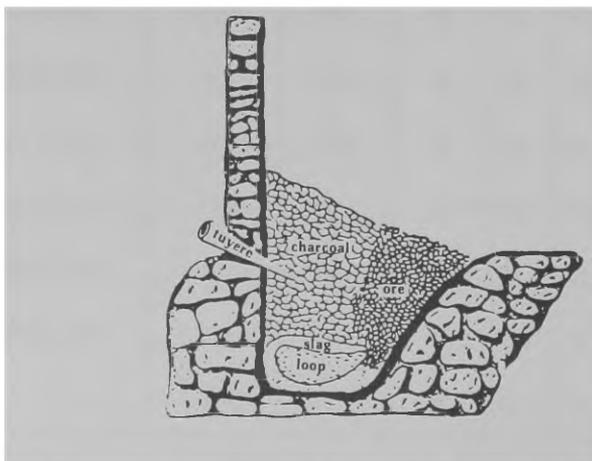


Fig. 12 — Corte transversal de uma forja catalã, de aprox. 1300 d.C., onde o ferro não era obtido líquido, mas como ferro esponja, pois a temperatura máxima não excedia 1200°C.

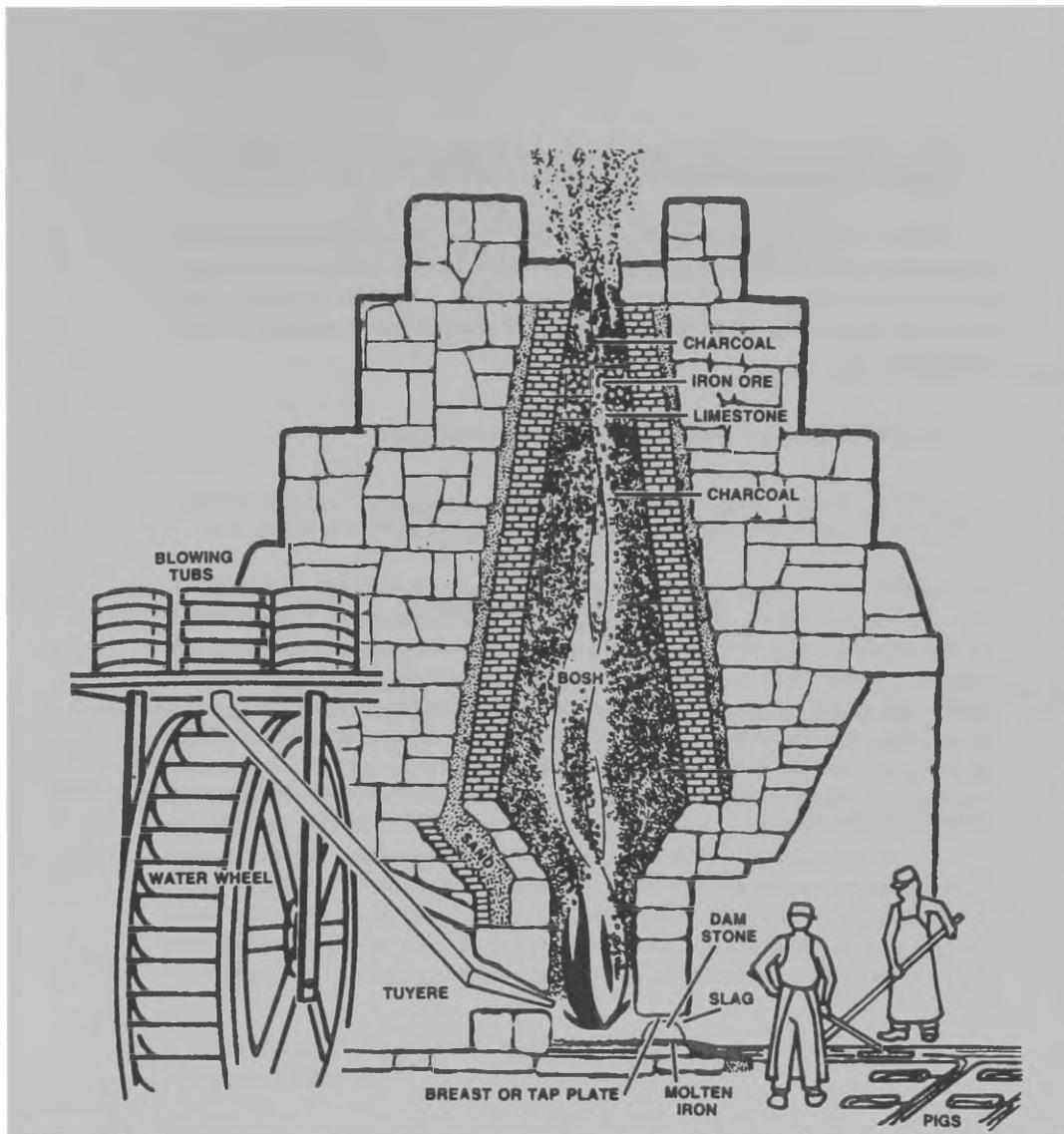


Fig. 13 — Corte de um alto-forno do século XVIII (Hammersmith Metal).

ponto de fusão e conseqüentemente aumenta a fluidez do ferro líquido.

Na Fig. 12 temos uma comparação da composição química de peças de ferro fundido romanas escavadas na Grã-Bretanha e uma composição típica de um bloco de motor diesel Mercedes-Benz produzido na Sofunge. À exceção do teor de fósforo, que está muito elevado, a composição da peça de Stratford deve apresentar propriedades mecânicas superiores às demais.

A Fig. 12 mostra ainda um esquema de uma forja catalã, de aprox. 1300 d.C., onde a temperatura do ferro não excedia 1200 °C. Notemos que ela não

difere muito dos fornos egípcios com fole, 2000 anos mais antigos. Apenas no século XVIII, com o desenvolvimento dos alto-fornos, como o mostrado na Fig. 13, quantidades maiores de ferro puderam ser produzidas.

Conclusões

A técnica de fundição na antigüidade, apesar do seu desenvolvimento empírico, conseguiu produzir peças de boa qualidade, sendo que o grau de evolução do processo, em muitos casos, esteve próximo do atual.

ARRUDA, L.E. Técnicas metalúrgicas de elaboração de ligas e fundição. *Rev. do Museu de Arqueologia e Etnologia*, São Paulo, Suplemento 2: 27-40, 1997.

ARRUDA, L.E. Metallurgical techniques of melting and casting alloys. *Rev. do Museu de Arqueologia e Etnologia*, São Paulo, Suplemento 2: 27-40, 1997.

ABSTRACT: This work presents an over-view of the metal casting techniques and its evolution in basic points. Copper and iron, the most important metal for Archaeology, will have its development analyzed and ancient castings, as samples of ancient slags, analysed for other works, will be compared with recent material, in properties and chemical composition.

UNITERMS: Alloys — Metal casting — Ancient metallurgy.

Referências Bibliográficas

BACHMANN, H.-G.

1980 Early copper smelting techniques in Sinai and in the Negev as deduced from slag investigations. (Ed.) by P.T. Craddock, *Scientific studies in early mining and extractive metallurgy*. British Museum.

SANDERS, C.A.; GOULD, D.C.

1976 *History cast in metal*. Cast Metals Institute, American Foundrymen's Society.

SCHELL, B.

1989 *Egyptian metalworking and tools*. Shire Publications Ltd.