

Indústria de fundição: situação atual e perspectivas

Bruna Pretti Casotti, Egmar Del Bel Filho e Paulo Castor de Castro

<http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>

Indústria de fundição: situação atual e perspectivas

Bruna Pretti Casotti
Egmar Del Bel Filho
Paulo Castor de Castro*

Resumo

A crise financeira deflagrada em 2008 afetou fortemente a indústria de fundição, que não resistiu ao enfraquecimento da economia, reduzindo drasticamente a sua produção e, conseqüentemente, o emprego de mão de obra.¹ O ano de 2010 apresentou-se como um período de recuperação, mas o setor espera que a produção volte ao patamar de 2008 (pré-crise) apenas em 2011.

De forma global, a indústria de fundição passa por mudanças estruturais irreversíveis, e o setor automotivo,² seu principal cliente, ditará o ritmo dessa transformação. Para atender às novas exigências da legislação

* Respectivamente, economistas e gerente do Departamento de Indústria Pesada da Área Industrial do BNDES.

¹ A indústria brasileira de fundição, que gerava cerca de 60 mil empregos, em outubro de 2008, passou a empregar cerca de 50 mil trabalhadores, em outubro de 2009.

² No Brasil, a indústria automotiva responde por 58% das vendas dos fundidos em geral.

ambiental dos diversos países, as montadoras disputam uma corrida pelo desenvolvimento de veículos “ecoficientes”.³ A indústria de fundição terá de estar preparada para oferecer materiais e produtos capazes de atender às novas demandas.

Que ações deve adotar a indústria brasileira de fundição para aumentar sua competitividade? Como o BNDES pode contribuir nesse momento de significativas mudanças conjunturais e estruturais da indústria?

Este texto busca, de forma não exaustiva, sistematizar a atual estrutura da indústria de fundição e responder esses questionamentos.

Introdução

Histórico

O processo de fundição consiste na fabricação de peças metálicas por meio do preenchimento, com metal líquido, de um molde cuja cavidade apresenta dimensões similares às da peça que se deseja produzir.⁴

Embora não haja um consenso, acredita-se que tal processo seja conhecido desde 5000 a.C., quando já se faziam objetos em cobre fundido por meio de moldes em pedra lascada [Rossitti (1993)].⁵ Uma razão plausível para que o cobre tenha sido o primeiro metal fundido pelo homem, de forma não acidental, é o seu baixo ponto de fusão. Ao longo da Idade do Bronze, com início em torno de 3300 a.C., as técnicas de fundição evoluíram. A adição de estanho ou arsênio ao cobre formou a nova liga conhecida como bronze, o que aumentou a dureza do metal e permitiu ao homem produzir armas e armaduras de alta resistência. Entretanto, por muito tempo, materiais em bronze eram considerados artigos de luxo, de modo que seu uso não era estendido a soldados ou plebeus.

Naquela época, o processo em “cera perdida”⁶ já era conhecido na China e na Mesopotâmia. Achados arqueológicos mostram que, entre

³ Veículos que consomem menos combustíveis e emitam menos CO₂.

⁴ Uma definição mais técnica e atual para fundição consiste “na preparação, fusão e refino de insumos metálicos, seu vazamento em moldes (por gravidade, pressão, centrifugação ou vácuo) e na limpeza e acabamento das peças brutas assim obtidas” [Monticelli (1994)].

⁵ Sergio Mazzer Rossitti (maio de 1993).

⁶ Mais detalhes sobre o processo podem ser encontrados na terceira seção.

1700 a.C. e 1100 a.C., artesãos da dinastia Shang utilizavam esse processo de fundição para fabricar objetos artísticos de paredes finas, com desenhos sofisticados.

Segundo Loper (2003), apesar de o minério de ferro ser encontrado em abundância na natureza, o primeiro fundido de ferro conhecido é considerado relativamente recente, datando de 600 a.C. Trata-se de um tripé de 275 kg produzido na China. Outras fontes indicam que o processo de fundição de ferro era conhecido antes disso e, por volta de 1000 a.C., os chineses já produziam peças de ferro fundido em temperaturas mais elevadas, obtidas em fornos de carvão soprados por foles [Ribeiro (2008)].

Os primeiros fundidos em ferro tinham baixíssima resistência à fratura. Apenas mais tarde introduziu-se o carvão durante o processo de fusão, conferindo maior resistência à peça final.

No período romano, de 250 a 100 a.C., a metalurgia do ferro já era largamente conhecida e aplicada na fabricação de machados, ferramentas, charruas, canos e armamento.

O processo produtivo, entretanto, não sofreu significativa evolução ao longo dos séculos seguintes. Os fundidos de ferro cinzento e os fundidos de ferro branco⁷ foram produzidos com poucas mudanças através dos anos [Loper (2003)]. Apenas em 1638 d.C., foram registrados os primeiros estudos científicos sobre a resistência dos metais à ruptura, realizados por Galileu Galilei [Ribeiro (2008)]. Inovações no método produtivo foram feitas no século XVII, por meio de incarbonização, que consiste na adição de carbono ao ferro – o que daria origem, futuramente, ao aço [Ribeiro (2008)]. O processo de fundição em aço data de 1740 e é atribuído ao inglês Benjamin Huntsman.

A descoberta, por Réaumur,⁸ da descarbonetização dos ferros fundidos brancos, provendo-lhes maior ductibilidade em seções finas, ocorreu apenas em 1722. Somente em 1830, Seth Boyden,⁹ por acidente, descobriu que certas composições de fundidos de ferro branco poderiam ser tratadas

⁷ A definição de ferro fundido branco pode ser encontrada na terceira seção.

⁸ Físico e inventor francês René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757).

⁹ Inventor estadunidense Seth Boyden (1788-1870).

a quente, de forma que o carboneto de ferro se decompunha para grafita, dando origem ao ferro fundido maleável de núcleo preto.

Durante a Segunda Guerra Mundial, foi realizado o controle da morfologia da grafita durante a solidificação, que possibilitou a descoberta do ferro dúctil por Morrogh e Millis. Essa descoberta proporcionou avanços significativos na ciência e na produção dos fundidos de ferro.

Portanto, “a família dos fundidos de ferro tem uma longa história, enquanto a família dos fundidos de ferro que conhecemos e usamos nas aplicações atuais de engenharia datam da metade do último século” [Loper (2003)].

No Brasil, a primeira casa de fundição surgiu por volta de 1580, em São Paulo, e era destinada à fundição do ouro extraído das minas do Jaraguá e arredores. No decorrer do século XVIII, muitas casas de fundição foram criadas em Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Bahia. A fundição de ferro passou a ser feita a partir do século XVII e, nos últimos dias do seu domínio, a coroa portuguesa chegou a construir alguns altos-fornos na colônia. A demanda por ferrovias e portos fomentou, por muito tempo, o desempenho das fundições, de modo que os pátios de reparo das companhias ferroviárias e os estaleiros passaram a ter as mais bem equipadas oficinas metalúrgicas do país [Bethell (2002)].

Mais tarde, com a chegada da indústria automotiva e a construção de Brasília, o setor de fundição ganhou novo fôlego, cumprindo um importante papel no desenvolvimento da indústria nacional.

Informações técnicas básicas

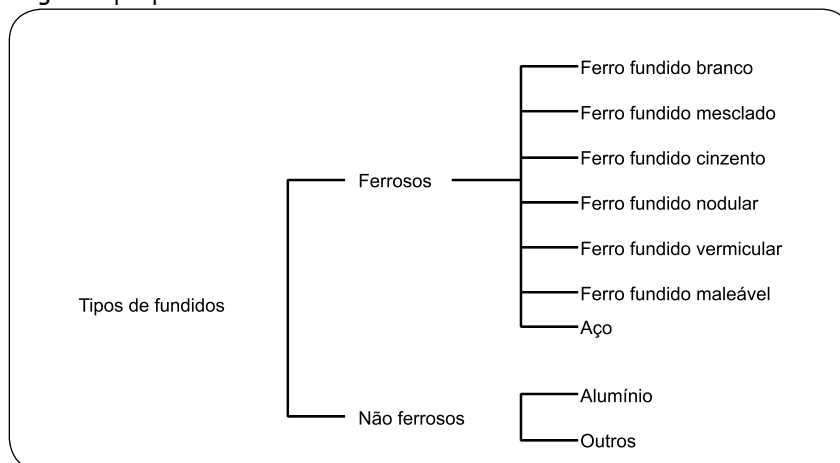
Para que se possa compreender melhor o atual estágio da indústria de fundição, serão apresentadas a seguir algumas informações técnicas básicas.

A seção foi dividida com base em duas variáveis-chave para a definição da indústria de fundição: a composição da liga do fundido e o tipo de processo de fundição utilizado, que afetam diretamente as propriedades mecânicas da peça final.

Ligas

Os fundidos podem ser classificados como ferrosos ou não ferrosos, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 | Tipos de fundidos



Fonte: Elaboração BNDES.

Fundidos ferrosos

“Os metais ferrosos são ligas de ferro com carbono (...) que se dividem em aço e ferros fundidos” [Malishev, Nikolaiv e Shuvalov (1970)]. Os ferros fundidos são ligas do sistema ternário Fe-C-Si,¹⁰ contendo teores de carbono superiores a 2%.¹¹ O aço, por sua vez, contém teores de carbono inferiores a 2%.

As propriedades mecânicas dos ferros fundidos são definidas, basicamente, por sua microestrutura, isto é, pela forma como o carbono se encontra distribuído: ele pode estar tanto combinado diretamente ao ferro (cementita) como em estado livre (grafita).

Fundidos sob a microestrutura cementita, também chamada de carboneto de ferro (Fe₃C), têm elevada dureza, alta resistência mecânica e

¹⁰ Ferro-carbono-silício. Nem sempre o silício aparece na definição de ferros fundidos. Em Chiaverini (1979), define-se ferro fundido como “ligas de ferro carbono com teor de carbono superior a 2%”. Entretanto, faz-se a ressalva de que “face à influência do silício nesta liga, sobretudo do ponto de vista de sua constituição estrutural, o ferro fundido é normalmente considerado uma liga ternária Fe-C-Si, pois o silício está presente frequentemente em teores superiores ao do próprio carbono”.

¹¹ Alguns autores utilizam o limite de 2,06% de carbono como separação teórica entre ferro fundido e aço [Chiaverini (1979)].

baixa tenacidade,¹² o que torna o metal duro, porém quebradiço. Fundidos com essa microestrutura apresentam, em geral, coloração mais clara.

A grafita é um alótropo¹³ natural do carbono e tem baixa dureza,¹⁴ baixa resistência mecânica, mas boa usinabilidade. A peça fundida composta em grafita apresenta coloração mais escura (na cor grafite), em decorrência da quantidade de carbono “solto” em sua estrutura.

A adição de determinados elementos na liga, como silício (Si), níquel (Ni), cromo (Cr), magnésio (Mg), molibdênio (Mo), vanádio (V) e manganês (Mn), altera a microestrutura do fundido, modificando as suas propriedades de rigidez e ductibilidade.¹⁵ O silício, o alumínio e o níquel favorecem a formação de grafita e conferem maior usinabilidade à peça. O cromo, o manganês, o molibdênio e o vanádio favorecem a formação de cementita, conferindo maior dureza e resistência mecânica à liga. O potássio e o enxofre são considerados impurezas e devem ser mantidos em baixas concentrações. O enxofre reduz a tenacidade do material e o potássio eleva a dureza. Teores acima de 0,5% de potássio causam forte fragilização da estrutura. O manganês também é utilizado como dissulfurante, para reduzir os efeitos do enxofre.

A velocidade de resfriamento durante a solidificação do material também influencia as propriedades mecânicas dos fundidos. Velocidades elevadas, promovidas por resfriamento contra superfícies metálicas (coquilhas ou resfriadores), favorecem a formação de cementita, enquanto baixas velocidades, promovidas por resfriamento de areia, favorecem a formação de grafita.

Além da composição química e da velocidade de resfriamento, a inoculação pode alterar as propriedades mecânicas dos ferros fundidos, favorecendo a formação de grafita. A inoculação consiste na adição de uma antiliga gra-

¹² Tenacidade é a medida de quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar. Um material pode ser classificado da seguinte forma, de acordo com a sua tenacidade: (i) frável: material que pode ser quebrado a pó com facilidade (ex: calcita); (ii) maleável: material que pode ser transformado em lâminas com facilidade (ex: ouro); (iii) dúctil: material que pode ser transformado em fios com facilidade (ex: ouro); (iv) flexível: material que pode ser dobrado com facilidade, sem capacidade para recuperar a sua forma anterior; e (v) elástico: material que pode ser dobrado com facilidade, com capacidade de recuperar a sua forma anterior.

¹³ Alotropia é o fenômeno em que um mesmo elemento químico pode originar substâncias simples diferentes. O carbono (C, de número atômico 6) tem como alótropos naturais o diamante e a grafita.

¹⁴ Dureza é a propriedade de um material sólido que apresenta resistência a deformações permanentes. Essa propriedade está diretamente relacionada com a força de ligação entre os átomos. De maneira não técnica, a dureza de um material é avaliada pela capacidade que este tem de riscar e ser riscado.

¹⁵ Um material é dito dúctil quando pode ser transformado em fios com facilidade.

nulada no metal líquido, para promover a formação de “núcleos sólidos” no metal, nos quais a formação de grafita pode começar. O processo permite a formação de microestruturas mais homogêneas e uniformes.

Alguns ferros fundidos também passam por tratamento térmico para terem suas propriedades alteradas, como veremos adiante.

Como características gerais, os ferros fundidos apresentam: (i) ponto de fusão relativamente baixo (1.200°C); (ii) custo baixo de produção, em parte associado ao menor uso de combustível para fundir o metal; e (iii) boa usinabilidade – principalmente se comparados ao aço.

Os fundidos ferrosos, dependendo de sua composição, podem ser classificados como brancos, mesclados, cinzentos, nodulares, vermiculares, maleáveis e aços.

Ferro fundido branco

O ferro fundido branco é uma liga do sistema ternário Fe-C-Si que contém baixos teores de silício. Sua microestrutura, à base de cementita, confere ao fundido coloração clara, elevada dureza, baixa tenacidade, elevada resistência ao desgaste, baixa ductibilidade e baixa usinabilidade. Tais propriedades tornam o fundido adequado para a fabricação de peças como cilindros de laminação.

O ferro fundido branco é obtido como processo intermediário para a obtenção do ferro maleável e do ferro mesclado.

Sua composição típica é dada por:

Composição química do ferro fundido branco		
Elemento	De	Até
C	2,0%	3,6%
Si	0,5%	1,9%
Mn	0,25%	0,8%
S	0,06%	0,2%
P	0,06%	0,2%

Ferro fundido cinzento

O ferro fundido cinzento é uma liga do sistema ternário Fe-C-Si que apresenta uma parcela relativamente grande de carbono na forma livre (grafita), o que confere uma coloração escura ao fundido.

A sua microestrutura é à base de grafita, na forma de veios (fraturas), o que lhe confere boa resistência mecânica, alta capacidade de amortecimento de vibrações, excelente usinabilidade, baixíssima ductibilidade, tenacidade superior à do ferro branco e baixo ponto de fusão. Dessa forma, máquinas e equipamentos pesados sujeitos a vibrações são feitos desse material.

Em geral, os metais fundidos apresentam contração após a solidificação, que precisa ser bem dimensionada na hora de confecção do molde da peça. No caso do ferro fundido cinzento, o efeito da contração do líquido é, em parte, compensado por uma leve expansão de volume, consequência da precipitação da grafita no momento da solidificação.

Sua composição química típica é dada por:

Composição química do ferro fundido cinzento		
Elemento	De	Até
C	3,2%	3,7%
Si	1,5%	2,1%
Mn	0,3%	0,8%
S	0,06%	0,2%
P	0,06%	0,2%

Ferro fundido mesclado

O ferro fundido mesclado é uma liga do sistema ternário Fe-C-Si com composição intermediária entre os ferros fundidos branco e cinzento. Sua microestrutura apresenta cementita e grafita.

O ferro fundido mesclado corresponde ao ferro fundido branco que, por efeito da velocidade de resfriamento e/ou da presença de altos teores de silício, apresenta microestrutura final composta por cementita na superfície e grafita no núcleo. Dessa forma, suas propriedades mecânicas são intermediárias entre as exibidas pelos ferros fundidos branco e cinzento.

Ferro fundido nodular (ou dúctil)

O ferro fundido nodular (ou dúctil) é uma liga do sistema ternário Fe-C-Si na qual o carbono se encontra na forma de grafita esferoidal, obtida pela adição de elementos nodularizantes, que modificam a forma de

crescimento da grafita. Entre esses elementos, estão o manganês (0,04% a 0,06%), o célio (0,02% a 0,04%) e o cálcio (0,01% a 0,02%).

A adição dos nodularizantes é feita em fornos pressurizados. O tratamento térmico é realizado com a liga em estado líquido e confere ao fundido maior ductibilidade, resistência mecânica, tenacidade e resistência à tração. A usinabilidade é comparável à do ferro cinzento. Tal liga apresenta resistência mecânica e ductibilidade que se aproximam das características do aço.

Peças fundidas como válvulas, carcaças de bombas, virabrequins e pinhões são feitas à base dessa liga.

Sua composição química típica é dada por:

Composição química do ferro fundido nodular		
Elemento	De	Até
C	3,2%	4,0%
Si	1,8%	3,0%
Mn	0,1%	1,0%
S	0,005%	0,02%
P	0,01%	0,1%

Ferro fundido vermicular (ou CGI)

O ferro fundido vermicular, também conhecido como CGI (*compacted graphite iron*), é uma liga do sistema ternário Fe-C-Si, na qual o carbono se encontra na forma de estrias grossas (“vermes”) de grafita.

Sua composição é similar à do ferro fundido nodular, com exceção da quantidade reduzida de magnésio, que fica num estreito intervalo de 0,010% a 0,012%. Assegurar a baixa variação desse elemento requer o uso de alta tecnologia no processo de fabricação.

A adição do magnésio nessas margens reduzidas confere ao fundido maior ductibilidade, maior resistência mecânica e menor oxidação que o ferro cinzento. O CGI revela maior fundibilidade e usinabilidade, quando comparado ao ferro fundido branco. Tem também menor coeficiente de expansão térmica e maior resistência ao choque térmico.

As pressões ambientais em favor da redução de emissão de CO₂ e poluentes têm reforçado a demanda por veículos automotores equipados com

motores menores, mais leves e potentes, em cuja fabricação vem sendo utilizado, cada vez mais, o ferro fundido vermicular. Além de blocos e cabeçotes, o CGI é também utilizado na fabricação de bases para grandes motores a diesel, cárteres, rodas dentadas e engrenagens.

O processo de fabricação do CGI é conhecido desde 1980, mas poucos são os fabricantes que oferecem fundidos nessa liga. Em um processo industrial de larga escala, torna-se difícil um controle apurado, tanto da quantidade de magnésio na composição da liga quanto das condições de injeção do magnésio. O magnésio tem ponto de evaporação menor do que o ponto de fusão do ferro, o que facilita a sua evaporação durante o processo. Há ainda uma dificuldade referente ao uso de sucata: as empresas que a utilizam devem estar atentas para o controle apurado da matéria-prima. Isso requer tecnologia para realizar as correções químicas em sua composição antes da fabricação da peça em ferro vermicular.¹⁶

Ferro fundido maleável

O ferro fundido maleável é obtido por meio do tratamento térmico (em temperatura e atmosfera adequadas) do ferro fundido branco. Tal tratamento lhe confere maior ductibilidade, mesma dureza e mesma resistência à tração, à fadiga e ao desgaste que as apresentadas pelo ferro fundido branco. É utilizado, geralmente, na fabricação de flanges, conexões, válvulas navais e outras peças para a indústria pesada.

Aço

Segundo definição de Chiaverini (1979), o “aço é uma liga de ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% até cerca de 2,0%¹⁷ de carbono, além de certos elementos residuais resultantes do processo de fabricação”.

Seu preparo depende de três componentes básicos: coque (ou carvão vegetal), calcário e minério de ferro. Em sua fabricação, primeiramente

¹⁶ Para reduzir o motor sem comprometer seu desempenho, é necessário aumentar as pressões na câmara de combustão. Isso eleva a exigência mecânica sobre as peças do motor, podendo gerar falhas prematuras por fadiga. O ferro fundido cinzento não se mostra adequado às novas demandas. O CGI, por sua vez, apresenta o dobro da resistência apresentada pelo ferro fundido cinzento, o que lhe confere capacidade para suportar as novas pressões dos motores sem exigir paredes mais grossas, o que comprometeria o peso do veículo e o esforço de redução do consumo de combustível.

¹⁷ Na prática, raras vezes o conteúdo de carbono no aço ultrapassa 1,4%.

é feita a introdução de coque,¹⁸ calcário e minério de ferro dentro de um alto-forno. O coque é utilizado como combustível e como “capturador” do oxigênio associado ao minério de ferro. Uma vez aquecido, o calcário decompõe-se em cal e CO₂, de modo que a cal se incorpora à escória, reduzindo sua temperatura de fusão e permitindo que a escória saia líquida por cima do ferro. Dessa maneira, o calcário facilita a separação do ferro fundido da “escória”,¹⁹ realizando uma extração preliminar das impurezas do metal. O ferro fundido resultante ainda contém alto teor de impurezas, contaminantes (enxofre, silício e magnésio) e carbono, sendo denominado ferro-gusa.

Os elementos ditos contaminantes encontram-se em quantidades não controladas para a formação do aço, o que torna necessária a aplicação de um processo de refino. O processo de Lintz-Donavitz (LD, ou de oxigênio básico) data de 1950²⁰ e é, até hoje, a base dos processos de refino das grandes aciarias. Nele, o ferro-gusa é recolhido do alto-forno, levado a um conversor, em que a temperatura média chega a 1.600°C, e submetido à injeção de um sopro de oxigênio puro. Controlando rigidamente a quantidade de oxigênio, fixa-se o teor de impurezas que se pretende eliminar. Os componentes indesejáveis reagem com o oxigênio, formando compostos voláteis. As reações que acontecem dentro do conversor liberam energia, de modo que o processo se autossustenta, sendo desnecessário realimentá-lo com energia externa.

Do conversor sai o aço comum, que pode ser vazado em moldes, nos quais se solidifica, formando lingotes. O processo dentro do conversor é relativamente rápido e é feito em grande escala.

Para a produção de aços com propriedades especiais (anticorrosão, resistência etc.), o processo é feito, em geral, em fornos elétricos, que atingem temperaturas mais altas (3.500°C).

¹⁸ O coque é o resíduo do aquecimento do carvão dentro da câmara de coqueificação, em ausência de oxigênio.

¹⁹ Componentes não desejáveis na fabricação do aço, como o enxofre.

²⁰ Em 1856, Henry Bessemer já trabalhava com um processo similar ao do oxigênio básico, na Inglaterra. A diferença estava no “sopro”, que utilizava ar atmosférico em vez de oxigênio puro. O ar atmosférico tem alto teor de nitrogênio, o que favorece a formação de um material mais quebradiço. Por causa das limitações tecnológicas da época, não havia métodos para obtenção de oxigênio com alto grau de pureza.

O processo de fundição de peças em aço é tecnicamente similar ao de fundição em outras ligas ferrosas. As indústrias de fabricação de bens de capital e da construção civil são as maiores demandantes de peças fundidas em aço.

Embora o aço não possa ser tecnicamente classificado como “ferro fundido”, os fundidos em aço são classificados como fundidos ferrosos (diferenciando-se dos fundidos não ferrosos, cujas ligas não têm ferro em sua composição).

Fundidos não ferrosos

Entre os fundidos não ferrosos estão os fundidos em alumínio, zinco, cobre e magnésio. E entre esses, o alumínio revela a maior importância comercial, tanto nacional como internacionalmente. No mundo, cerca de 75% dos fundidos não ferrosos são produzidos em alumínio. Esse percentual chega a 90% no Brasil.

Foram encontrados artigos de argila com alumina, utilizados para a fabricação de cosméticos e medicamentos, que datam de 3000 a.C. Entretanto, somente em 1854 foram obtidas as primeiras quantidades comerciais do alumínio. Em 1886, foi desenvolvido o processo eletrolítico para fabricação desse metal em larga escala (Hall-Heroult) – que é, até hoje, a base do processo de redução do alumínio na indústria.

A obtenção do alumínio divide-se em três etapas: mineração, refino e redução. Na fase de mineração, obtém-se a bauxita, minério avermelhado que deve conter, no mínimo, 30%²¹ de alumina aproveitável, para que a produção de alumínio seja economicamente viável. Na fase de refino, realiza-se a extração de alumina presente na bauxita. O processo de Bayer, aplicado nessa fase, consiste na adição de soda cáustica à bauxita, seguida da filtração do material sólido, que é concentrado e cristalizado em alumina. Os cristais de alumina são secos e calcinados para a retirada de toda a água, restando apenas a alumina em pó branco. Na fase de redução, transforma-se o pó de alumina em alumínio por meio do processo eletrolítico de Hall-Heroult.

De forma geral, de cada quatro toneladas de bauxita são extraídas duas toneladas de alumina, que resultam em uma tonelada de alumínio.

²¹ Este teor raramente passa de 55% na natureza.

O alumínio pode ser classificado como primário ou secundário. O alumínio primário é o resultado direto da redução da alumina. O seu preço é negociado na London Metal Exchange (LME), e o seu processo de obtenção é intensivo em consumo de energia elétrica, que responde por 30% a 35% do custo de fabricação.

A indústria do alumínio é o maior consumidor industrial de energia elétrica. Chega a consumir cerca de 1% de toda a energia gerada no mundo e o equivalente a cerca de 7% de todo o consumo industrial. [International Rivers Network (2003)]. No Brasil, a indústria do alumínio é responsável por mais de 6% do total de energia elétrica consumida, incluindo a proveniente de autogeração.²²

O alumínio secundário corresponde àquele que é reciclado, geralmente utilizado na composição de ligas metálicas. Apesar de não ser negociado em bolsa, seu preço acompanha as flutuações da LME. O processo de fabricação de fundidos em alumínio secundário é menos intensivo em energia elétrica, que corresponde a apenas 2% do custo de produção.

Processos de fundição

A escolha do processo de fundição é fundamental na definição do grau de precisão dimensional, do acabamento e das propriedades mecânicas da peça que se pretende fabricar. O material do molde é uma importante variável do processo. Por exemplo, a taxa de dissipação do calor varia de acordo com esse material, o que determina o tamanho final do grão formado, que, por sua vez, influencia a resistência mecânica do fundido. As peças resultantes podem passar por um processo de acabamento, como a usinagem ou o forjamento.²³

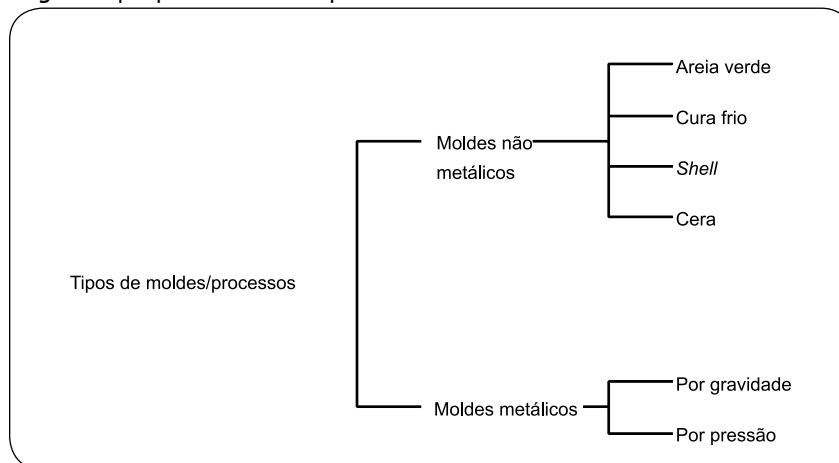
Por essa razão, os processos são, em geral, classificados de acordo com o molde escolhido (Figura 2).²⁴

²² Henrique Ostronoff. Indústrias do setor de produção de metal primário consolidam projetos de autogeração. Energia para o alumínio. *Revista do Alumínio*. Edição 13. Disponível em: < <http://www.revistaaluminio.com.br/textos.asp?codigo=11136> >.

²³ Outros processos mais caros e elaborados permitem melhor acabamento da peça e dispensam a necessidade de usinagem.

²⁴ Em relação ao processo de cera perdida, há um abuso de notação. O molde não é feito de cera, mas de uma lama refratária.

Figura 2 | Tipos de moldes e processos

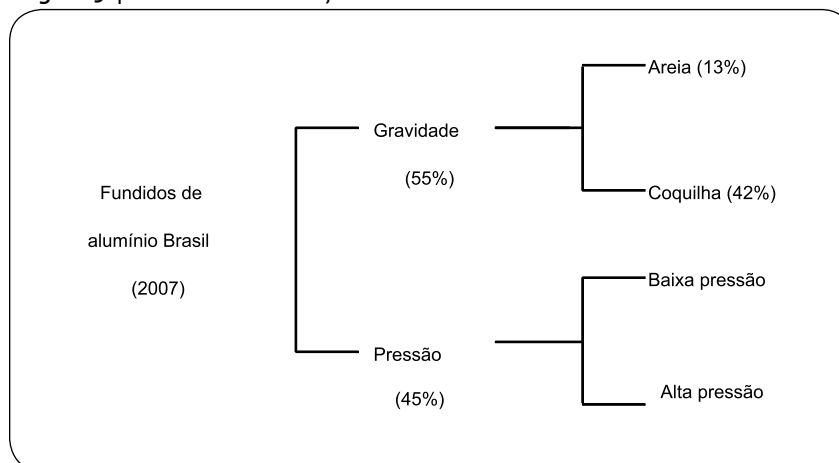


Fonte: Elaboração BNDES.

O método mais tradicional de fundição de metais ferrosos no Brasil envolve o uso de moldes confeccionados em areia.

Assim como o ferro, o alumínio pode ser fundido por diversos métodos, variando-se o tipo de molde utilizado (areia, coquilha, metálicos sob baixa pressão). No Brasil, a maioria das peças fundidas em alumínio é fabricada pelo método de gravidade em coquilha (Figura 3).

Figura 3 | Métodos de fundição do alumínio



Fonte: Elaboração BNDES.

No mundo, entretanto, o sistema de fundição sob pressão é o mais utilizado. Na Europa, Estados Unidos e Japão, esse método responde por, respectivamente, 55%, 59% e 68% dos fundidos em alumínio destinados à indústria automotiva.

Areia verde

O processo que utiliza molde em areia verde é largamente empregado na indústria, dada a sua simplicidade tecnológica, o baixo custo e a facilidade de recuperação da areia. Como desvantagens, esse método oferece risco de heterogeneidade da areia, o que influencia a qualidade da peça, propiciando um acabamento superficial inferior ao dos demais processos e um risco de erosão do molde para peças de tamanho grande.

Entre as principais etapas do processo, estão as seguintes:

Confecção do modelo da peça. O primeiro passo para a obtenção do fundido é a confecção de um modelo com o formato da peça final. As dimensões devem ser calculadas levando em conta a taxa de contração do metal na fase de solidificação. O modelo pode ser confeccionado em madeira, metal, plástico, gesso, isopor, resina etc.

Confecção do molde. O molde é o dispositivo no qual o metal fundido é despejado e cuja cavidade tem formato similar ao da peça final. Feito em material refratário, o molde deve ser capaz de resistir às altas temperaturas dos metais líquidos.

No caso do processo em areia verde, o molde é composto de uma areia-base²⁵ (sílica, cromita, zirconita etc.), argila e resina,²⁶ que funciona como um aglomerante capaz de aumentar a resistência mecânica do molde.

²⁵ Quanto à areia, deve-se considerar: a granulometria (quanto mais fina a areia, melhor o acabamento superficial); a permeabilidade (quanto mais grossa a areia, mais fácil é a saída dos gases); a resistência ao calor da areia (quanto maior o teor de óxido de ferro na areia, maior a resistência a quente da areia); e a resistência mecânica da areia (quanto maior a umidade da areia sintética, maior a sua resistência mecânica), entre outras variáveis.

²⁶ Quanto à areia, deve-se considerar: a granulometria (quanto mais fina a areia, melhor o acabamento superficial); a permeabilidade (quanto mais grossa a areia, mais fácil é a saída dos gases); a resistência ao calor da areia (quanto maior o teor de óxido de ferro na areia, maior a resistência a quente da areia); e a resistência mecânica da areia (quanto maior a umidade da areia sintética, maior a sua resistência mecânica), entre outras variáveis.

Em alguns casos, o modelo é composto de duas metades, que, unidas, têm o formato da peça. A primeira metade é fixada a uma placa metálica, que é então aquecida e revestida com desmoldante (ex: silicone). A placa junto ao modelo é posta no fundo de uma caixa, que é então preenchida com areia de moldagem. O conjunto é rodado em torno do seu eixo horizontal em 180°, de modo que a placa e o modelo passam para a superfície, sendo facilmente retirados. Ao fim desse processo, tem-se uma caixa com a areia no formato externo da metade da peça que se pretende fabricar. Esse é o meio-molde da peça. O mesmo deve ser feito com a outra metade.

Confecção do macho, massalotes, respiros e canais de vazamento. Os machos são colocados nos moldes antes que estes sejam fechados para receber o metal líquido. Diferentemente do molde, que é uma peça em areia que delimita as partes externas da peça fundida, o macho é uma peça em areia que delimita as partes internas (vazios).

Durante o vazamento, o macho fica completamente envolto em metal líquido. Deve-se, portanto, considerar a capacidade de dissipação dos gases de queima da resina que aglomera a areia do macho. Uma falha nessa respiração pode causar uma evolução explosiva dos gases, com consequente expulsão do metal líquido de dentro do molde. Com menor severidade, podem ser formadas bolhas na peça.

Posto que o metal se contrai durante a solidificação, é necessária a construção de reservatórios com metal líquido para compensar a contração. Tais reservatórios são denominados massalotes e, quando mal dimensionados, podem causar um vazio na peça.

Também é necessária a confecção de respiros (canais para a saída do ar e dos gases de combustão da resina da areia durante o vazamento no molde) e canais de vazamento (dutos que levam o metal despejado da panela de vazamento até o interior do molde).

Fechamento do molde. O molde é composto de duas metades, sendo o macho colocado no interior da primeira e fechado pela segunda. Nessa fase, é fundamental garantir a limpeza dos moldes, para que não haja inclusão de outros materiais no metal, o que poderia comprometer a resistência da peça.

Fusão. Nessa fase, o metal é fundido em um forno de indução. As variáveis mais importantes desse processo são a temperatura do forno, a composição química do fundido e a correção da mesa, caso necessário.

Vazamento. O metal líquido é transferido do forno para a panela de vazamento, que despejará o metal no molde. As principais variáveis nessa fase são a limpeza da panela, a temperatura e a velocidade de vazamento. Uma velocidade muito alta pode provocar erosão da areia e inclusão de grãos na peça.

Desmoldagem. Operação de retirada da peça sólida de dentro do molde. É importante controlar a temperatura em que a operação é feita, para evitar choque térmico e consequentes trincas na peça. Atualmente, existem processos capazes de recuperar 98% da areia, que é então utilizada em novos moldes.

Corte de canais e massalotes. Remoção do metal excedente que ficou nos canais e nos massalotes. Essa remoção pode ser feita com corte por disco abrasivo ou por fusão localizada.

Rebarbação e limpeza. Após o corte dos canais e massalotes, essas áreas precisam de acabamento superficial. É necessária a retirada de incrustações de areia do molde na peça fundida. Essa limpeza é feita, em geral, com jatos abrasivos.

Inspeção e recuperação. Por fim, marcam-se os defeitos da peça durante ensaios de inspeção visual, líquido penetrante, ultrassom ou radiografia. Em seguida, testam-se as propriedades físicas e mecânicas do material. Os defeitos são removidos e reparados por solda (com exceção dos ferros fundidos, que não admitem recuperação por solda) para serem novamente inspecionados.

Uma polêmica ambiental em relação a esse processo produtivo envolve a areia descartada de fundição (ADF). A quantidade consumida de areia depende do tipo da peça produzida e varia entre 0,8 e 1 tonelada para cada tonelada de fundido. Após a etapa de desmoldagem, cerca de 90% da areia pode ser facilmente reinserida no processo de produção, mas cerca de 10%, contaminada ao longo do processo, tem de ser descartada. Os órgãos de controle ambiental estão aumentando a fiscalização

em relação à destinação final dessa areia. Atualmente, grande parte desse resíduo é destinada a aterros industriais, sendo um pequeno percentual comprado por empresas fabricantes de cimento. Há diversas pesquisas que investigam a viabilidade do aproveitamento dessa areia em misturas asfálticas no Brasil. Segundo testes realizados por equipe²⁷ do Instituto Militar de Engenharia (IME) e publicados em artigo na 123ª edição da *Revista da Abifa*, existe viabilidade técnica para o uso de ADF em substituição a agregados finos, em massa asfáltica para pavimentação.

Em casca (*shell*)

No processo em casca (*shell*), o modelo é feito em metal e reproduz as duas metades da peça, que são fixadas em placas junto a canais alimentadores. Uma areia especial com resina reveste as placas, que são aquecidas por meio de bicos de gás. O calor funde a areia,²⁸ formando uma casca de 10 mm a 15 mm sobre o modelo. O molde desse processo, em geral, contém de 3% a 10% de resina, sendo o restante areia, isenta de argila.

A secagem (cura) mais utilizada é a quente. As resinas mais empregadas são poliéster, ureia formaldeído ou fenol formaldeído.

O endurecimento da casca completa-se quando a placa é colocada em uma estufa a temperaturas de 350°C a 450°C. O molde (*shell*) extraído tem o formato das duas metades da peça. Nele é feito o vazamento do metal fundido.

Esse processo oferece melhor acabamento superficial e maior facilidade de liberação dos gases que o processo em areia verde. Entretanto, há maiores limitações em relação ao tamanho da peça que pode ser fabricada e ao custo de produção.

Cera perdida

No processo de cera perdida, também conhecido como microfusão, os modelos são produzidos em cera, por meio do vazamento de cera líquida em uma matriz metálica (aço ou alumínio), cujas cavidades têm o formato e a dimensão da peça desejada.

²⁷ Costa, Pinto, Ventorini e Vieira (2010).

²⁸ A adição de resinas aperfeiçoou o uso da areia para moldagem, o que reduz a necessidade de compactação, pois o aglomerante mantém juntos os grãos de areia.

Os moldes são compostos de uma lama refratária especial (feita com sílica ou zircônia, misturada a aglomerante e outros componentes), que, após o endurecimento, fica com aparência similar à da cerâmica.

Nesse caso, deve-se atentar para um abuso de notação. A cera é utilizada apenas para compor o modelo, e não o molde, contrariando o padrão das denominações dos processos anteriores.

O processo consiste no mergulho do modelo de cera em um reservatório ou tanque com lama especial, formando um envoltório pastoso sobre o modelo. O conjunto é retirado para endurecimento da lama, que, após a solidificação, consistirá no molde da peça. A retirada do modelo de dentro do molde é feita por aquecimento do conjunto, de modo que a cera derrete e escoar, permanecendo apenas uma casca de cerâmica, cujo interior vazio tem o formato da peça que se deseja produzir. A cera recolhida pode ser reutilizada para a produção de novos modelos. É feito o vazamento do metal líquido dentro da casca em cerâmica. Após a solidificação da peça em metal no interior do molde, este é quebrado, finalizando assim o processo de fundição.

Como vantagens, esse método apresenta um ótimo acabamento superficial e facilidade de liberação dos gases pelo molde, além de permitir a produção de peças com desenhos complexos. Como desvantagens, destacam-se o custo elevado de fabricação e a limitação do tamanho das peças que podem ser produzidas.

Como o processo de fundição por cera perdida permite excelente acabamento superficial e caracteriza-se pela estreita tolerância dimensional das peças, também é conhecido como processo de fundição de precisão. Tais fundidos têm alto valor agregado e são utilizados pelas indústrias aeroespacial, de geração de energia, nuclear, médica e automotiva. Peças de aparelhos ortodônticos, dispositivos internos de armas e até detalhes de joias também utilizam esse tipo de fundidos.

Estima-se que as vendas mundiais de fundidos de precisão, em 2007, tenham totalizado US\$ 10 bilhões, dos quais 37% são atribuídos à América do Norte, 28% à Europa e 33% à Ásia (a China, sozinha, responde por 20% das vendas mundiais).

Em número de plantas de produção, entretanto, esses percentuais se alteram. A China concentra 36% das plantas de fundidos de precisão, o restante da Ásia concentra outros 39%, a América do Norte, 12%, e a Europa, 11% [Abifa (2010a)].

Molde permanente – fundição por gravidade (coquilha)

Os moldes metálicos (também denominados coquilhas) são feitos, geralmente, em aço ou ferro fundido e são usados cerca de 100 mil vezes ao longo de sua vida útil. Como o custo do molde é elevado, o processo é mais adequado para a produção em escalas elevadas.

A fundição em moldes metálicos está restrita a fundidos de metais cuja temperatura de fusão seja mais baixa do que a do aço ou ferro fundido. Costuma ser usada para a produção de peças em ligas de chumbo, zinco, alumínio, magnésio e bronze.

Em geral, as peças obtidas por esse processo são pequenas e de formatos simples e requerem mais uniformidade, melhor acabamento e maior resistência mecânica que as permitidas pelo processo com molde de areia. Bielas, pistões e coletores de admissão costumam ser fabricados por esse processo.

Molde permanente – fundição sob pressão

O processo de molde permanente consiste em forçar a penetração do metal líquido na cavidade do molde metálico, também conhecido como matriz, por meio de pressão.

A injeção do metal líquido contido na câmara de injeção para dentro da cavidade do molde (em geral, fabricado em aço) é feita com a ação de pistões.

Na primeira fase, o ar é eliminado da câmara de injeção. Depois, há um rápido preenchimento da cavidade do molde para evitar o resfriamento do metal. A última etapa é a compactação do metal para diminuir o volume das microporosidades decorrentes da contração de solidificação do metal [Abal].

O processo é automatizado, e a vida útil de cada molde varia entre 50.000 e 1.000.000 de injeções. O Quadro 1 resume os diferentes processos de fundição abordados.

Quadro 1 | Comparação entre os processos de fundição

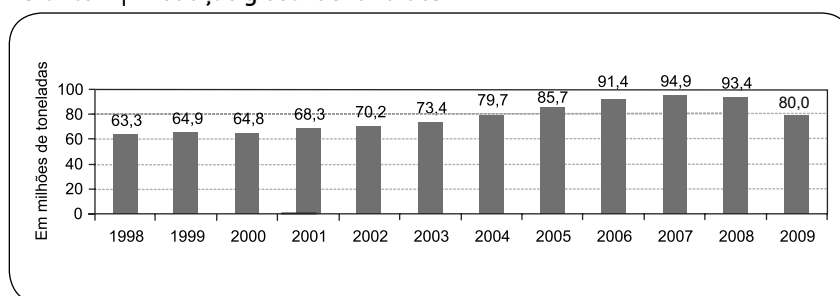
Propriedades	Areia verde	Shell	Cera	Molde metálico (gravidade)	Molde metálico (injeção)
1 Tolerância dimensional	1,2 mm a 3,8 mm	0,25 mm a 5 mm	0,02 mm a 3,8 mm	2,5 mm a 7,5 mm	2,5 mm a 12,5 mm
2 Peso fundido	"Ilimitado"	250 lb	100 lb	100 lb	75 lb
3 Espessura mínima	2,5 mm	2,5mm	1,6 mm	3,2 mm	0,8 mm
4 Acabamento superficial	Razoável	Bom	Bom	Bom	Ótimo
5 Custo	Baixo	Médio	Alto	Alto	Muito alto
6 Capacidade de fundição de peças complexas	Razoável	Bom	Ótimo	Razoável	Bom
7 Gama de ligas que podem ser fundidas	"Ilimitada"	"Ilimitada"	"Ilimitada"	Indicado para alumínio e cobre	Indicado para alumínio

Fonte: Elaboração BNDES.

A indústria global de fundição

A produção global de fundidos é de 90 milhões de toneladas.²⁹ Até a eclosão da crise financeira internacional, no fim de 2008, a indústria de fundição vinha mostrando crescimento consistente, de 4,5% ao ano, desde 2000. Com a crise, a produção de fundidos apresentou decréscimo de 2% frente a 2007 – a primeira queda em oito anos.

Gráfico 1 | Produção global de fundidos



Fonte: Modern Casting.

²⁹ Desde 2006, a produção global tem alcançado valores superiores a 90 milhões de toneladas, com exceção do ano de 2009, cuja produção foi de 80 milhões, em razão da crise financeira. Entretanto, com a recuperação econômica verificada em diversos países emergentes, ao longo de 2010, estima-se que a produção deverá retornar ao patamar de 90 milhões de toneladas.

Em 2009, a produção voltou a cair, atingindo o patamar de 80 milhões³⁰ de toneladas. A redução acentuada foi resultado do prolongamento dos efeitos da crise sobre as indústrias metal-mecânica e automotiva, principais clientes do setor. A título de exemplo, o segmento de veículos comerciais pesados (cujas demandas por fundidos é significativa) teve sua produção reduzida em 39% nos Estados Unidos, 49% no Japão e 64% na Europa.

O ano de 2010, entretanto, mostrou recuperação. A retomada deveu-se, largamente, ao desempenho das economias emergentes, responsáveis pela maior parte da produção mundial.

É notável o crescimento da produção de fundidos em mercados emergentes. Essa é uma tendência natural, advinda do crescimento dessas economias e das pressões ambientais maiores nos países desenvolvidos, que forçam a transferência da produção poluidora para países em que a legislação ambiental é menos restritiva.

Desde 2007, mais de um terço da produção mundial de fundidos vem da China, que se destaca como a maior produtora mundial, com larga vantagem em relação aos Estados Unidos e à Rússia – respectivamente, segundo e terceiro colocados. Essa configuração difere daquela observada no fim da década de 1990, quando a produção de fundidos no mundo era de 60 milhões de toneladas, com liderança dos Estados Unidos, seguidos da China e do Japão (Tabela 1). A Tabela 2 detalha a produção de fundidos dos maiores produtores mundiais, no ano de 2009.

O crescimento da produção chinesa de fundidos foi bastante expressivo. Os fundidos são utilizados, principalmente, na infraestrutura, na siderurgia e na indústria automotiva, setores que cresceram aceleradamente na China, na última década.

Há alguns anos, a qualidade dos fundidos chineses era questionável, e alegava-se que o baixo preço do produto era resultado de um regime de trabalho semiescravo dentro das fundições. Segundo a Abifa, a qualidade de muitos fundidos chineses já é comparável à do produto nacional, e o avanço conseguido pela China nesse mercado não é resultado apenas das condições de trabalho (que já são comparáveis às

³⁰ Segundo dados do Census 2009, publicado pela Modern Casting em dezembro de 2010, a produção mundial de fundidos em 2009 foi de 80,3 milhões de toneladas. Essa diferença foi causada, principalmente, pela incompatibilidade entre os dados da Modern Casting e os dados fornecidos pela Associação Brasileira de Fundição (Abifa).

Tabela 1 | Produção de fundidos no mundo (1998, 2008 e 2009)*

1998				2008				2009			
Ranking	País	Toneladas	%	Ranking	País	Toneladas	%	Ranking	País	Toneladas	%
1º	Estados Unidos	13.223.700	21	1º	China	33.500.000	36	1º	China	35.300.000	45
2º	China	10.194.006	16	2º	Estados Unidos	10.783.829	12	2º	Índia	7.443.200	9
3º	Japão	6.223.596	10	3º	Rússia	7.800.000	8	3º	Estados Unidos	7.408.071	9
4º	Rússia	4.500.000	7	4º	Índia	6.840.500	7	4º	Japão	4.385.998	6
5º	Alemanha	4.448.692	7	5º	Alemanha	5.783.691	6	5º	Rússia	4.200.000	5
6º	Índia	3.385.900	5	6º	Japão	5.653.798	6	6º	Alemanha	3.901.665	5
7º	França	2.588.953	4	7º	Brasil	3.355.232	4	7º	Brasil	2.296.916	3
8º	Itália	2.330.722	4	8º	Itália	2.638.011	3	8º	Coreia	2.135.000	3
9º	Reino Unido	1.924.300	3	9º	França	2.388.038	3	9º	França	1.736.704	2
10º	Brasil	1.570.000	2	10º	Coreia	2.065.900	2	10º	Itália	1.668.802	2
11º	Coreia	1.522.700	2	11º	México	1.827.665	2	11º	México	1.485.324	2
Total		63.318.297	100	Total		93.375.388	100	Total		79.153.012	100

Fontes: Abifa e Modern Casting 2010.
* A inserção da tabela de 2008 na comparação deve-se ao fato de que o ano de 2009 foi atípico, em virtude da crise financeira mundial.

Tabela 2 | Maiores produtores mundiais por setor (2009)

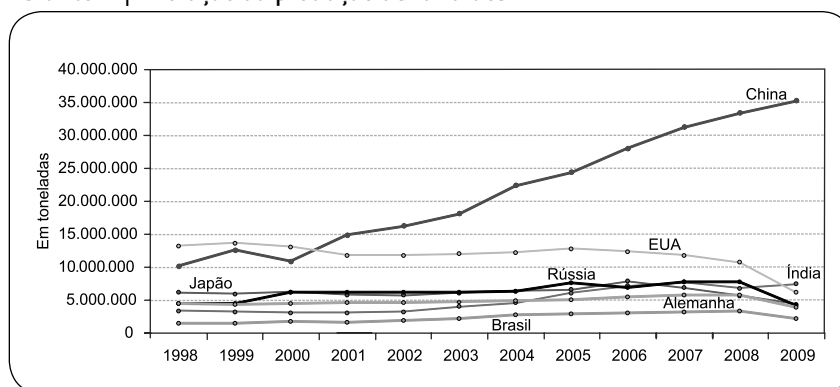
Produção de fundidos	China		Índia		Estados Unidos		Rússia		Japão		Alemanha		Brasil		Total	
	Toneladas	%	Toneladas	%	Toneladas	%	Toneladas	%	Toneladas	%	Toneladas	%	Toneladas	%	Toneladas	%
Ferro cinzento	17.000.000	48	5.050.000	68	2.409.483	33	1.740.000	41	1.653.901	38	1.806.480	46	1.365.030	59	31.024.894	48
Ferro dúctil	8.700.000	25	800.000	11	2.553.725	34	1.200.000	29	1.364.644	31	1.191.786	31	525.971	23	16.336.126	25
Ferro maleável	600.000	2	60.200	1	35.380	1	60.000	1	37.235	1	31.273	1	26.850	1	850.938	1
Aço	4.800.000	14	880.000	12	686.739	9	700.000	17	198.248	5	182.435	5	166.382	7	7.613.804	12
Base de cobre	600.000	2		0	178.715	2	90.000	2	75.284	2	76.720	2	12.075	1	1.032.794	2
Alumínio	3.350.000	9	653.000	9	1.191.345	16	340.000	8	1.025.507	23	540.444	14	194.569	8	7.294.655	11
Magnésio		0		0	66.224	1	35.000	1	6.280	0	19.859	1	3.233	0	130.596	0
Zinco		0		0	166.922	2	15.000	0	20.563	0	51.193	1	2.806	0	256.484	0
Outros	250.000	1		0	119.748	2	20.000	0	4.336	0	1.475	0		0	395.559	1
Total	35.300.000	100	7.443.200	100	7.408.071	100	4.200.000	100	4.385.998	100	3.901.665	100	2.296.916	100	64.935.850	100

Fonte: Modern Casting (2010).

de outros países emergentes), mas também da reduzida carga tributária que recai sobre a cadeia produtiva. Os encargos trabalhistas na China são de cerca de 12%, contra cerca de 65% no caso brasileiro.

O número de plantas de fundição na China é superior à soma de todas as plantas existentes nos demais países, chegando a cerca de 26 mil. Esse é um avanço considerável em relação a 1998, quando o país contava com menos de 11 mil fundições. Nesse período, a China seguiu um caminho inverso ao da maioria dos países, que reduziram o número de plantas em seus domínios.

Gráfico 2 | Evolução da produção de fundidos



Fonte: Modern Casting.

Tabela 3 | Número de plantas de fundição

	1998	2009	Ranking 2009
China	10.997	26.000	1º
Índia	6.000	4.600	2º
EUA	2.950	2.060	3º
Japão	1.318	1.697	4º
Rússia	1.900	1.350	5º
Brasil	1.034	1.331	6º
Turquia	1.052	1.246	7º
Itália	410	1.121	8º
Ucrânia	1.044	960	9º
Coreia	722	873	10º

Fonte: Modern Casting (2010).

Tabela 4 | Custo homem X hora em US\$ (dados de 2005)

Maior custo	País	US\$/hora
1º	Alemanha	25,40
2º	França	19,50
3º	EUA	17,57
4º	Espanha	16,10
5º	Canadá	14,63
6º	Brasil	4,60
7º	Rússia	3,50
8º	China	1,75
9º	México	1,70
10º	Índia	1,00

Fonte: Abifa/Apex (2006a).

Nos Estados Unidos, o número de fundições em 1955 chegou a 6.150, passando a 3.300 em 1990. Atualmente, o país conta com 2.060 plantas, das quais 48% dedicam-se à fundição de metais não ferrosos. O movimento de redução teve diferentes motivos, como as fusões e aquisições dentro do próprio mercado e a migração para países emergentes, que ocorreu por razões de cunho ambiental, mercadológico e trabalhista.

A mão de obra está entre os principais custos da indústria de fundição, e a diferença entre os custos de países desenvolvidos e emergentes pode chegar a 25 vezes, como observado na Tabela 4.

O mercado norte-americano continua sendo o maior importador de fundidos do mundo. Em 2006, os Estados Unidos importaram 3,2 milhões de toneladas, das quais 24% partiram da China, 13% da Europa e 11% do Brasil.

Os países europeus também são grandes importadores, mas suprem sua demanda intracontinentalmente. Isto é, das importações dos países europeus, 78% advêm da própria Europa, 13% dos Estados Unidos, 5,6% da Ásia e apenas 2,5% do Brasil, o que mostra que os fundidos brasileiros ainda têm baixa penetração naquele continente.

Globalmente, a indústria automotiva é a maior cliente do setor de fundição, representando cerca de 40% das vendas. Nos Estados Unidos e no Japão, esse percentual é de, respectivamente, 31% e 50%. No Brasil, a indústria automotiva responde por 58% das vendas dos fundidos em geral, chegando a 75% quando se analisa apenas a venda de fundidos em alumínio.

Em razão do uso intensivo de fundidos em automóveis, muitas montadoras têm fundições cativas, cuja prioridade é o atendimento da demanda do grupo. Segundo dados do Departamento de Energia dos Estados Unidos, as

fundições cativas consomem cerca de 30% da energia no setor de fundição norte-americano.

Esse quadro se altera quando se leva em conta apenas a demanda por blocos e cabeçotes fundidos. Nesse caso, as fundições cativas respondem por cerca de 41% do que é demandado na América e por 28% na Europa.

As empresas do setor de fundição têm porte similar no mundo inteiro. Nos Estados Unidos, cerca de 80% das fundições têm menos de 100 funcionários.³¹ No Brasil, o percentual é parecido (78%). Segundo a Abifa, cerca de 90%³² da indústria de fundição é composta de micro, pequenas e médias empresas, e 97% das empresas são de capital nacional.

Tabela 5 | Demanda de blocos e cabeçotes em 2006 (em mil toneladas)

Tipo de fundição	América	%	Europa	%
Cativa	560	41	280	28
Independente	790	59	720	72
Total	1.350	100	1.000	100

Fonte: Fundição Tupy.

Quadro 2 | Principais *players* nacionais

Blocos e cabeçotes:	
Tupy	
Teksid	
Intercast	
WHB (entrando em operação no segundo trimestre de 2011)	
Veículos comerciais e agrícolas/peças:	
Schulz	
Frum	Hubner
BR Metals	Fagor
Ferrabras	Intercast
Fundimisa	Romi
Veículos de passeio/peças de suspensão	
Fagor	
WHB, Sada e Balancins (em fase de aprovação de produtos)	
Veículos de passeio/peças de freio	
WHB	
Sada	
Brembo	

Fonte: Fundição Tupy.

³¹ Dados de 2006.

³² Dados de 2009.

Quadro 3 | Principais *players* Internacionais

	INDEPENDENTES	CATIVAS
	Blocos e cabeçotes:	Blocos e cabeçotes:
NAFTA	Cifunsa	Ford (Cleveland)
	Technocast	GM (Defiance)
	Teksid	Outros:
	Dalton Foundries	Caterpillar
	Outros:	John Deere
	Waupaca	
	Motor Castings	
EUROPA	Blocos e cabeçotes:	Blocos e cabeçotes:
	Fritz Winter	Daimler
	Eisenwerk Bruhl	Peugeot
	Halberg Guss	MAN
	Luzuriaga	Scania
	Teksid	Volvo Powertrain
	Corra	
	Doktas	
	Erkunt	

Fonte: Fundação Tupy.

No entanto, as empresas de pequeno porte respondem por uma parcela relativamente pequena da produção, que é concentrada em um pequeno número de fabricantes de grande porte. No mundo inteiro, existem poucos produtores globais cuja participação é relevante no mercado.

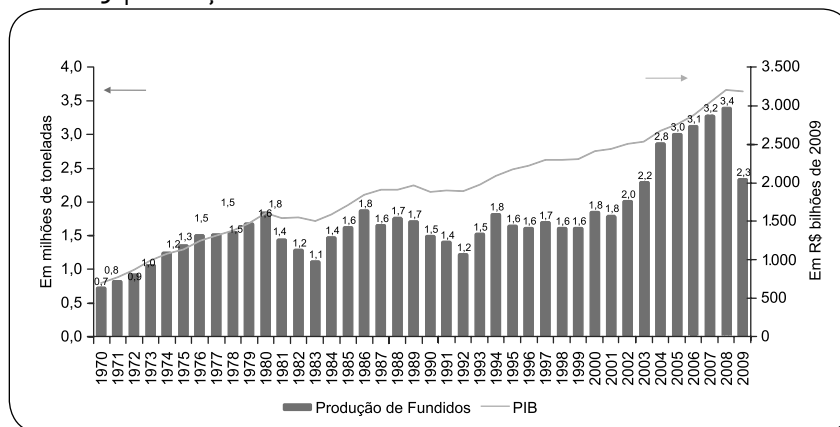
A indústria brasileira de fundição

A produção brasileira de fundidos é de 3 milhões de toneladas anuais, o que coloca o Brasil na sétima posição do *ranking* entre os maiores produtores globais. A indústria brasileira de fundição gera, aproximadamente, 60 mil empregos diretos.

De 1970 a 1980, a produção brasileira de fundidos cresceu de forma significativa, passando de 700 mil toneladas, em 1970, para cerca de 1,8 milhão de toneladas, em 1980. Nesse período, o Brasil realizou grandes investimentos em infraestrutura, o que manteve aquecida a indústria de fundição. A indústria automotiva, grande demandante de fundidos, aumentava sua importância no contexto industrial.

Entretanto, com a crise da dívida externa, no começo da década de 1980, os investimentos em infraestrutura no Brasil desabaram. Até 2000, não

Gráfico 3 | Produção anual brasileira



Fontes: Abifa, Lafis e Ipeadata.

houve qualquer salto significativo da produção de fundidos, cujo volume permaneceu em torno de 1,5 milhão de toneladas ao ano por duas décadas.

Foi apenas a partir de 2001 que a indústria brasileira de fundição passou a apresentar crescimento consistente, ultrapassando a barreira de três milhões de toneladas produzidas no ano de 2006.

Em 2009, entretanto, o setor sentiu os efeitos da crise financeira mundial. Foram produzidas 2,3 milhões de toneladas de fundidos, o que representou uma queda de 30% em relação à produção do ano anterior. Como pode ser visto no Gráfico 3, a produção de 2009 chegou aos patamares observados em 2003.

No que se refere ao emprego de mão de obra, podem-se observar dois momentos distintos, ao longo das últimas décadas. De 1970 a 1990, o número de empregados acompanhou o ritmo de produção, demonstrando que, no período, não houve ganho significativo de produtividade. A partir de 1990, com a abertura do mercado, a indústria de fundição foi forçada a se modernizar. O novo ciclo de investimentos pelo qual passou a indústria automotiva elevou não só a demanda como também o nível de qualidade exigido dos fornecedores de fundidos. Desde então, houve um descolamento entre produção de fundidos e número de empregados, caracterizando um ganho significativo de produtividade, que passou de 22 t/homem.ano, em 1990, para 45t/homem.ano, em 2000.³³ Com a pro-

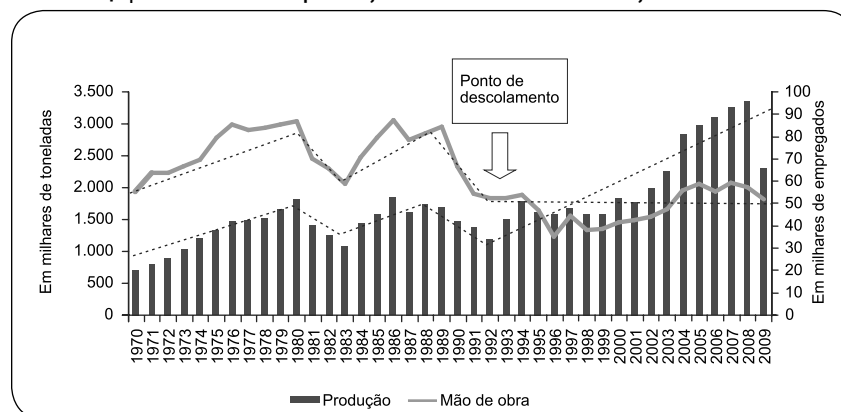
³³ Em 1997, a produtividade passou para 37,5, próxima de padrões americanos e japoneses, que apresentam produtividade anual superior a 40 t por empregado [Soares (2000)].

dução estagnada ao longo da década, verifica-se uma queda significativa no número de empregados, que passou de 66 mil, em 1990, para apenas 38 mil, em 1999.

Apenas a partir de 2000 o número de empregados voltou a crescer de forma consistente. Boa parte desse crescimento é resultado da forte expansão do setor automotivo (em torno de 11% a.a., entre 2002 e 2009). Responsável por 37,9% da demanda de fundidos em 1986, o setor automotivo aumentou sua participação para 58% em 2009. As exportações também tiveram um comportamento bastante favorável, com crescimento médio anual de 10,6% entre 1987 e 2007.³⁴ Para atender à crescente demanda do período, a indústria de fundidos teve de voltar a contratar.

A crise, no entanto, interrompeu essa trajetória. Depois de ter empregado diretamente cerca de 60 mil funcionários em julho de 2008, a indústria de fundição enxugou sua folha de pagamentos, registrando 48 mil empregos diretos em julho 2009. No entanto, as contratações voltaram a ocorrer no segundo semestre daquele mesmo ano e se estenderam a 2010, quando o setor alcançou novamente a marca de 60 mil empregados.

Gráfico 4 | Mão de obra e produção na indústria de fundição brasileira

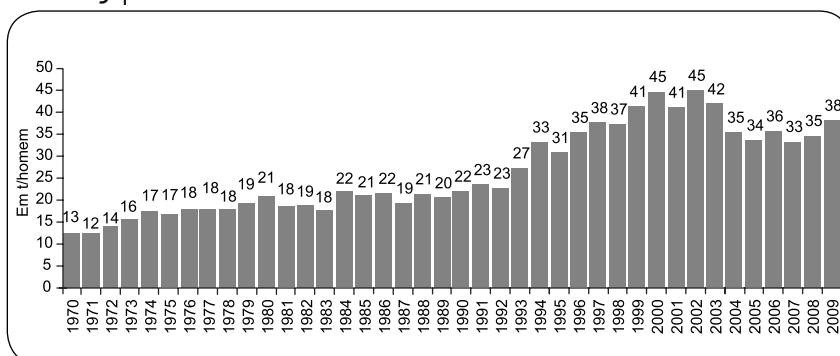


Fontes: Elaboração BNDES, com base em Abifa.

Apesar da valorização cambial, as exportações de fundidos mostraram uma tendência crescente nos últimos anos. Entretanto, com a crise

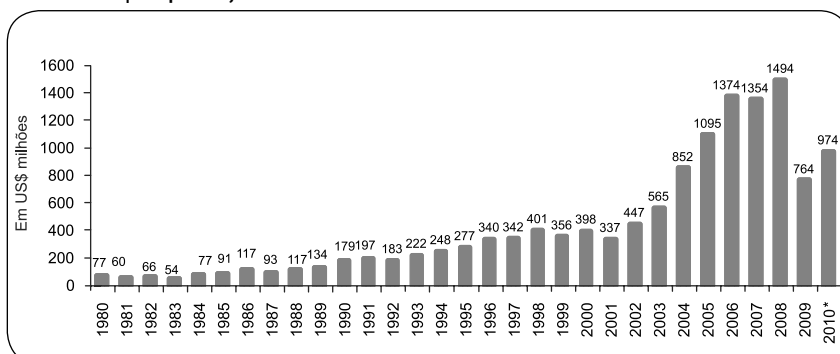
³⁴ A participação das exportações na demanda por fundidos passou de 7,8%, em 1986, para 23%, em 2006, e caiu significativamente a partir de 2007, chegando a 13% em 2010.

Gráfico 5 | Produtividade



Fontes: Abifa.

Gráfico 6 | Exportação



Fontes: Abifa.

financeira de 2008, houve uma queda brusca do valor exportado, como pode ser visto no Gráfico 6. A indústria automotiva mundial sofreu com as incertezas geradas pela falta de liquidez no mercado. Passou, então, a pressionar seus fornecedores a reduzir os preços estabelecidos e suspendeu parte das encomendas.

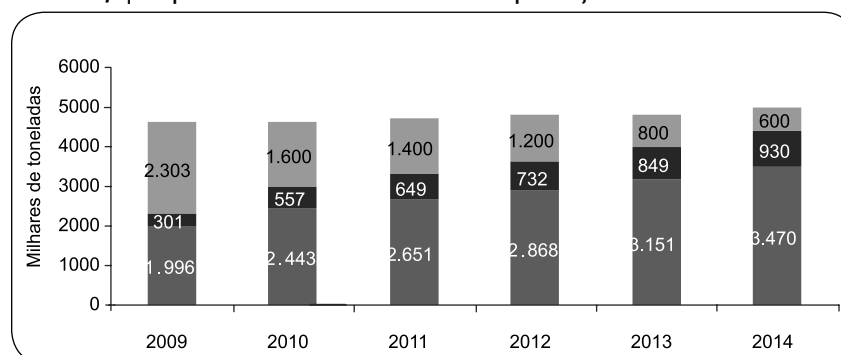
O desempenho no ano de 2010 foi bastante positivo. No período de janeiro a outubro, foram produzidas 2.713 mil toneladas, uma evolução de 46% frente ao ano de 2009, superando as expectativas iniciais. Em termos de vendas, a previsão é que a indústria de fundidos fature US\$ 10 bilhões em 2010, o que representa um aumento de 47%, comparado ao faturamento do

ano anterior. As exportações, que atualmente representam 13% do destino da produção nacional de fundidos, reagiram na mesma proporção. O total de pessoas empregadas subiu de 52 mil, em dezembro de 2009, para 61 mil, em outubro de 2010. Tal número ficou acima do máximo verificado no período pré-crise, quando o setor empregou 60,7 mil funcionários.³⁵

Segundo a Abifa (2010b, p. 30), a recuperação foi puxada pela alta da produção de caminhões e ônibus, amplamente incentivada por linhas oficiais de crédito. Esses setores, cujas vendas chegaram a cair 10,2% e 16,2%, respectivamente, em 2009 [Anfavea (2010)], apresentaram crescimento de 43,5% e 25,6% em 2010 [Anfavea (2011)].

Para os próximos anos, a Abifa projeta um crescimento consistente tanto para o mercado interno quanto para o externo. Para acompanhar essa evolução, a indústria de fundição deverá investir em aumento de capacidade, chegando a cinco milhões de toneladas em 2014. Estima-se que os investimentos entre 2008 e 2012 alcancem um valor próximo a US\$ 1,22 bilhão, aumentando a capacidade instalada em cerca de 800 mil toneladas.

Gráfico 7 | Capacidade instalada e destino da produção de fundidos



Fontes: Guia Abifa 2010.

A produção brasileira de fundidos concentra-se em ligas ferrosas (90%).³⁶ Como pode ser visto na Tabela 6, essa composição pouco se alterou ao longo das últimas décadas. As ligas não ferrosas (alumínio,

³⁵ Refere-se a julho de 2008.

³⁶ Inclui a produção de fundidos em aço.

cobre, magnésio e zinco) apresentam pequena participação na produção total, mas têm alto valor agregado e boas perspectivas de crescimento, com destaque para o alumínio.

A produção está concentrada nas Regiões Sudeste e Sul, principais demandantes de fundidos, dada a importância das indústrias metal-mecânica e automotiva nessas regiões. Segundo dados de 2007, o estado de São Paulo é o maior produtor de fundidos, respondendo por 36% da produção nacional. Somando-se a produção da Região Centro-Oeste à de Minas Gerais, obtém-se 28% do total nacional, mesmo percentual alcançado pela Região Sul. O estado do Rio de Janeiro responde individualmente por 6%, enquanto as Regiões Norte e Nordeste, em conjunto, representam 2,5%.

Como pode ser observado na Tabela 7, nos últimos 15 anos houve um deslocamento da produção para a Região Sul, embora São Paulo ainda se destaque como o principal produtor. A desconcentração da indústria automotiva nas últimas décadas³⁷ e a consolidação (fusões e aquisições) da indústria de fundição, especialmente no Sul, explicam, em parte, esse movimento.

Tabela 6 | Produção brasileira de fundidos (em %)

Liga	1970	1980	1990	2000	2009
Ferrosos (exclui aço)	87	85	85	87	83
Aço	9	9	7	5	7
Não ferrosos	4	7	8	8	9
Alumínio	n.d.	n.d.	5	6	8
Outros	n.d.	n.d.	3	2	1
Total (%)	100	100	100	100	100
Total (em mil toneladas)	691	1.798	1.453	1.811	2.297

Fonte: Abifa.

Tabela 7 | Produção brasileira de fundidos por região (em %)

Região/estado	1992	2007
São Paulo	43	36
Centro-Oeste e Minas Gerais	30	28
Sul	18	28
Rio de Janeiro	7	6
Norte e Nordeste	1,5	2,5

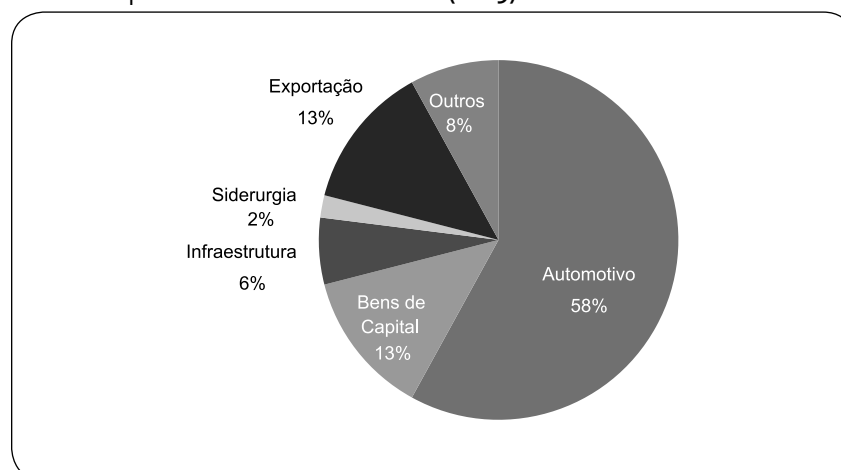
Fontes: Gomes et al. (1996) para o ano de 1992 e Lafis (2008) para o ano de 2007.

³⁷ Ver Santos e Burity (2002) e Casotti e Goldenstein (2008).

De forma isolada, a indústria de fundição responde por 3% do PIB industrial brasileiro, mas adquire maior relevância quando se consideram as principais indústrias que abastece, com destaque para a automotiva, que representa 23% do PIB industrial.

Atualmente, o setor automotivo responde por 58%³⁸ das vendas nacionais de fundidos. O setor de bens de capital aparece em seguida, com participação de 13% (mesmo percentual das exportações). A demanda do setor de siderurgia, que atualmente corresponde a apenas 2% da demanda de fundidos, já representou 16,5% no passado.³⁹ O Gráfico 8 ilustra a distribuição da produção nacional de fundidos por destinação.

Gráfico 8 | Brasil – Destino de fundidos (2009)



Fontes: Abifa.

Uma vantagem comparativa para a indústria de fundição nacional é a autossuficiência na obtenção das principais matérias-primas: ferro-gusa,⁴⁰

³⁸ Dados de 2009.

³⁹ Valor referente ao ano de 1996. Essa queda ocorreu por causa da introdução do método de lingotamento contínuo no processo produtivo da indústria siderúrgica, em substituição ao método convencional, que utilizava grande número de peças fundidas.

⁴⁰ O ferro-gusa é o ferro fundido em seu estado primário. É o produto imediato da redução do minério de ferro pelo coque ou carvão vegetal e calcário dentro do alto-forno. O Brasil é o maior produtor de ferro-gusa com base no carvão vegetal, sendo Minas Gerais o estado com maior número de produtores. A maior parte da produção de ferro-gusa no Brasil está voltada para a exportação (cerca de 69%).

ferroligas e alumínio. O Brasil é o segundo maior produtor mundial de ferro-gusa e exporta 69% da sua produção. A produção de ferroligas e alumínio atende plenamente o mercado interno. Os gastos com matéria-prima representam 57% do custo de produção no caso de fundidos ferrosos e 42% para não ferrosos, conforme a Tabela 8.

Em 2009, o Brasil tinha 1.331 fundições (90% delas são micro, pequenas e médias empresas). A Abifa congrega 550 dessas empresas, que respondem por mais de 95% da produção nacional. Entre elas, 90% produzem menos de 10 mil toneladas ao ano, e apenas as três maiores empresas (Fundição Tupy, Teksid e BR Metals) responderam por pouco menos de um quarto da produção nacional em 2009 (Tabela 9).

A Tabela 10 mostra a distribuição acumulada da produção das 550 empresas associadas à Abifa em 2009.

Tabela 8 | Composição média do custo de fundidos no Brasil (em %)

Itens	Ferrosos	Não ferrosos
Matéria-prima	57	42
Energia	6	2
Mão de obra	23	20
Gastos indiretos	14	36
Total	100	100

Fonte: Fundição Tupy.

Tabela 9 | Produção das 10 maiores fundições brasileiras em 2009 (em toneladas)

1	Tupy S.A – Joinville	278.000
2	Teksid do Brasil Ltda.	184.000
3	BR Metals Fundições Ltda.	98.515
4	WHB Fundição S.A.	70.000
5	Alumínios Jaguar Ltda.	63.690
6	Mahle Metal Leve S.A.	62.230
7	Zavi Modelação e Fundição Ltda.	58.000
8	WEG Equipamentos Elétricos S.A.	56.000
9	Amsted Maxion Fund.	54.819
10	Schulz S.A	45.000

Fonte: *Guia Abifa* 2010 (os dados da tabela foram informados pelas empresas à Abifa).

Tabela 10| Histograma de produção

Tonelada/ano	Frequência	% cumulativo
Até 2.500	389	78,43
5.000	38	86,09
10.000	19	89,92
20.000	26	95,16
50.000	15	98,19
100.000	7	99,60
200.000	1	99,80
300.000	1	100,00
Mais	0	100,00

Fonte: *Guia Abifa* 2010 (os dados da tabela foram informados pelas empresas à Abifa).

As empresas de grande porte concentram as exportações, pois apresentam escala que garante rentabilidade e confiabilidade para assumir contratos de longo prazo, compromissos de entrega de lotes mínimos e investimentos contínuos. Segundo dados da Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos (Apex), em 2005 as quatro maiores empresas de fundidos ferrosos responderam por 49% das exportações brasileiras. Contando as 15 maiores, esse percentual passava de 70%. As seis maiores produtoras de fundidos não ferrosos responderam por 71% das exportações nacionais.

Na última década, o coeficiente de exportação⁴¹ da indústria brasileira de fundição variou de 13% a 23%, sendo que cerca de 80% das exportações⁴² destinaram-se ao setor automotivo. Os integrantes do Nafta⁴³ são o principal destino das exportações brasileiras, tanto para fundidos ferrosos quanto para não ferrosos, respondendo, respectivamente, por 60% e 34% dessas exportações. Em seguida, vêm a Europa e o Mercosul, como pode ser visto na Tabela 11. Pode-se dizer que a importância dos Estados Unidos nas vendas de fundidos brasileiros acentuou os efeitos da crise financeira de 2008 sobre a indústria nacional.

Atualmente, as fundições brasileiras vêm agregando qualidade e valor aos fundidos exportados, oferecendo, por exemplo, produtos já usinados. Outra forma de ganhar competitividade está na redução do tempo de desenvolvimento das peças. Essas são maneiras de lidar com a concorrência internacional de produtos asiáticos extremamente baratos, entre eles os chineses.

⁴¹ Razão entre o total das exportações em toneladas e o total da produção em toneladas.

⁴² Valor referente ao ano de 2007.

⁴³ North American Free Trade Agreement – Tratado Norte-Americano de Livre Comércio.

Tabela 11 | Destino das exportações – dados de 2006 (em %)

Destino	Ferrosos	Não ferrosos
Nafta	60	34
Europa	22	26
Mercosul	9	21
Outros	9	19

Fonte: Abifa/Apex (2006b).

De acordo com a Abifa,⁴⁴ os fundidos ferrosos (inclui aço) representam apenas 3% de todos os produtos chineses importados pelo Brasil. Trata-se de um percentual pequeno quando comparado às importações de máquinas e materiais elétricos (31%) ou equipamentos mecânicos (38%) da China, mas é grande o suficiente para incomodar a indústria de fundição nacional. Além disso, é preciso lembrar que a própria importação de maquinário reduz a demanda interna de fundidos.

Deve-se enfatizar que a indústria brasileira vem enfrentando outros fortes concorrentes além dos chineses. Muitos conjuntos automotivos estão sendo importados, parcial ou integralmente, dos Estados Unidos, do Japão e de países da Europa.

Em alguns casos, os preços (FOB) dos fundidos brasileiros chegam a ser superiores aos preços (FOB) europeus. Segundo dados apresentados no Congresso de Inovação Tecnológica – Cintec 2010 Fundição,⁴⁵ o preço do fundido brasileiro em 2008 chegou a US\$ 2,00/kg, contra US\$ 1,80/kg na Europa e US\$ 1,40/kg na Ásia. Tais diferenças geraram mudanças nas políticas de compra de insumos das montadoras,⁴⁶ que repercutiram negativamente na balança comercial do setor.

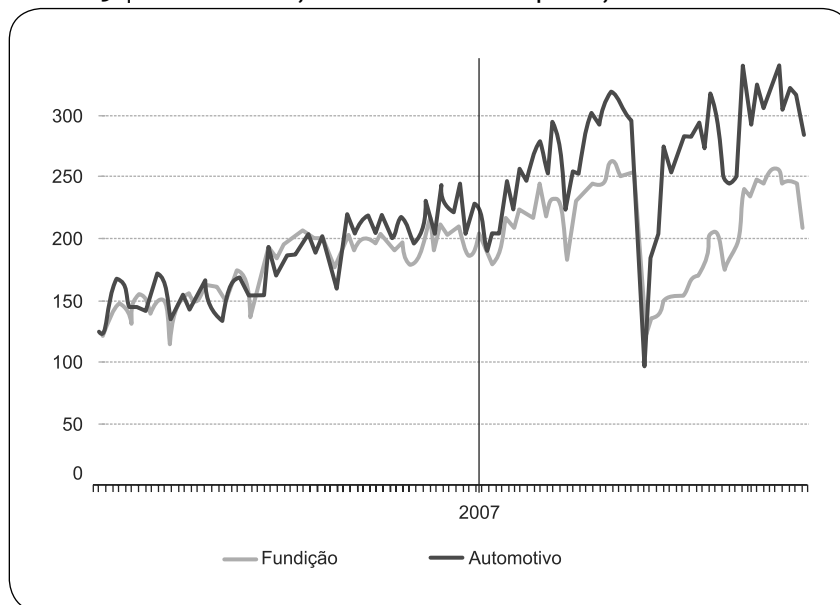
Observa-se recentemente um descompasso no desempenho demonstrado por montadoras e fundições. Segundo a Abifa, o descolamento entre o crescimento das duas indústrias pode ser atribuído à progressiva substituição de fundidos nacionais por importados pelas empresas de autopeças e montadoras. Tal substituição ocorreu ora em razão da forte demanda das montadoras, não atendida pelos fornecedores locais, ora, em outros períodos, pela vantagem comercial proporcionada às importações pelo câmbio valorizado.

⁴⁴ XI Seminário de Metais Não Ferrosos 2009

⁴⁵ Congresso organizado pela Sociedade Educacional de Santa Catarina (Sociesc).

⁴⁶ Desde 2001, a importação de autopeças conta com um redutor de 40% da alíquota de importação. A Lei 12.350, de 20 de dezembro de 2010, estabeleceu a eliminação gradativa do redutor de autopeças, atendendo ao pleito de diversas entidades, entre elas a Abifa. O redutor será inteiramente eliminado a partir de 1º de junho de 2011.

Gráfico 9 | Setor de fundição: vendas internas x produção de veículos



A atuação recente do BNDES

O apoio do BNDES à indústria de fundição é operado pela sua Área Industrial, por intermédio do Departamento de Indústria Pesada (AI/DEPIP).

Com a sua atual denominação e configuração, o AI/DEPIP já aprovou oito operações de financiamento ao setor, num montante de R\$ 480 milhões, para apoiar investimentos em implantação, ampliação e modernização de instalações industriais. A Tabela 12 apresenta uma síntese do apoio financeiro do BNDES ao setor de fundição, ao longo da existência do DEPIP.

Dos investimentos apoiados, dois foram de implantação de fundições de alumínio (Teksid e Mecânica São Carlos).

Observa-se uma característica importante dos investimentos em implantação e ampliação de capacidade instalada do setor de fundição, ao longo dos últimos anos: seis das oito operações de financiamento aprovadas pelo BNDES referiam-se a plantas cativas, construídas ou ampliadas por grandes consumidores de fundidos, tais como Indústrias Romi, Grupo Randon (Castertech) e Grupo Fiat (Teksid).

Tabela 12 | Apoio do BNDES ao setor de fundição

Ano	Empresa	Valor do financiamento (em R\$ milhões)
2007	Romi (*)	10,0
2007	Castertech	83,0
2009	Fagor Ederlan	10,2
2009	Tupy	220,4
2009	Teksid	39,4
2009	Romi	82,5
2009	Menegotti	12,4
2010	Mecânica São Carlos (**)	22,0
Total		479,9

(*) Trata-se de um projeto que envolveu todas as unidades da empresa, no valor total de R\$ 50,7 milhões. O valor de R\$ 10 milhões representa uma estimativa da parcela do financiamento destinada efetivamente aos investimentos na planta de fundição.

(**) Apesar de aprovado pela Diretoria do BNDES, o financiamento foi cancelado a pedido da empresa.

Conclusões

A indústria de fundição passa por mudanças estruturais irreversíveis, em nível global, e o setor automotivo, seu principal cliente, dita o ritmo dessa transformação.

A pressão exercida pela legislação ambiental dos diversos países, em favor da redução das emissões de CO₂ e poluentes na atmosfera, forçou a indústria automotiva a desenvolver produtos cada vez mais econômicos, em termos de consumo de combustível. Uma rota natural para o alcance desse objetivo tem sido a redução do peso dos veículos.

Nesse sentido, o uso crescente de peças fundidas em alumínio na fabricação de veículos automotores se configura como uma importante tendência.⁴⁷ No entanto, o custo de aquisição mais elevado⁴⁸ e as propriedades mecânicas exigidas por alguns componentes (como blocos de

⁴⁷ Segundo dados apresentados no Cintec-2010, um veículo médio apresenta a seguinte composição de materiais: 50% aço, 19% ferro fundido, 8% fundidos não ferrosos (destaque para o alumínio), 7% plástico e 6% borracha. O uso de alumínio em veículos aumentou 80% na década de 1990, e hoje representa o fator mais importante no aumento mundial de consumo de alumínio [International Rivers Network (2003)]. No Brasil, a indústria automotiva é a maior cliente das fundições em alumínio, respondendo por 72% do destino das suas vendas.

⁴⁸ O custo médio de produção dos fundidos em alumínio (mesmo de ligas secundárias) tem decaído com o aumento da escala global, mas ainda é superior ao apresentado pelos componentes em ferro fundido. O preço de algumas peças em alumínio chega a ser superior ao dobro das suas similares em ferro.

motores de determinados veículos) ainda são limitadores para o seu uso em determinados segmentos da indústria automotiva.⁴⁹

Dado que a pressão por redução das emissões veiculares continuará a nortear os avanços das montadoras, é de esperar também que, num futuro próximo, os veículos elétricos, alimentados por baterias ou células de hidrogênio, possam apresentar viabilidade comercial para produção em larga escala. Isso não impedirá a coexistência temporária dos novos modelos com os veículos movidos a motores de combustão interna, que, no entanto, terão de atender a exigências ambientais cada vez mais rigorosas.

Um importante desafio para a indústria de fundição será o de lidar com uma eventual redução do consumo de fundidos, que seria decorrente da substituição, nos veículos automotores, dos motores a combustão interna por motores elétricos. Num primeiro momento, a popularização dos veículos híbridos poderá aumentar o consumo de fundidos (dado que haverá a introdução de motores elétricos em conjunto com os motores a combustão interna). No entanto, a eventual substituição dos veículos híbridos por veículos puramente elétricos deverá exercer um impacto relevante sobre a demanda global de fundidos, de consequências ainda imprevisíveis.

Referências

ABAL. *O alumínio: processos de produção. Fundição*. Disponível em: <http://www.abal.org.br/aluminio/processos_fundicao.asp>. Acesso em: fev. 2011.

ABIFA. *Revista da Abifa*, edição 122, jul. 2010a.

_____. *Revista da Abifa*, edição 123, ago. 2010b.

ABIFA/APEX. *Relatório final – Prospecção do mercado internacional de fundidos ferrosos e não ferrosos*. Abifa/Apex, dez. 2006a.

_____. *Relatório de mercado Abifa/Apex*, dez. 2006b.

ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Carta da Anfavea*, n. 284, jan. 2010.

_____. *Carta da Anfavea*, n. 296, jan. 2011.

⁴⁹ Um informe setorial dedicado à indústria de fundição de alumínio será publicado, em breve, no Portal do BNDES: www.bndes.gov.br.

BETHELL, Leslie (org.). *História da América Latina*. Vol. V: de 1870 a 1930. Trad. de Geraldo Gerson de Souza. São Paulo: Edusp; Imprensa Oficial SP; Brasília, DF: Funag, 2002.

CASOTTI, B.; GOLDENSTEIN, M. *Panorama do setor automotivo: as mudanças estruturais da indústria e as perspectivas para o Brasil*. BNDES Setorial, n. 28, p. 147-188, Rio de Janeiro, set. 2008.

CHIAVERINI, V. *Aços e ferros fundidos*. 4ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1979, p. 19.

COSTA, C. et al. A. Areia Descartada de Fundição em Substituição ao Agregado Fino em Misturas Asfálticas para Pavimentação. *Revista da Abifa*, n. 123, p. 100-110, ago. 2010.

GOMES, M. T. O. et al. G. A. *Indústria de fundição – segmento de peças para o setor automotivo*. Rio de Janeiro: BNDES, set. 1996.

INTERNACIONAL RIVERS NETWORK. *A conexão hidrelétricas e alumínio*. Relatório por Glenn Switkes, International Rivers Network. Debate Internacional Estratégico sobre a Indústria de Alumínio, São Luís de Maranhão, 16-18 out. 2003.

LAFIS. *Brasil-Fundição: Análise de Mercado*, set. 2008.

LOPER, J.R.; CARL, R. Cast irons – Essential alloys for the future. In: LXV Congresso Mundial de Fundição, Coreia do Sul, out. 2002. *Foundryman*, v. 96, parte 11, nov. 2003.

MÁLISHEV, A.; NIKOLAIEV, G.; SHUVALOVE, Y. *Tecnologia dos metais*. Trad. Luiz Aparecido Caruso. São Paulo: Mestre Jou, 1970.

MONTECELLI, C. A. *A competitividade da indústria brasileira de fundição*. 1994. Dissertação – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.

MODERN CASTING, 44º Census of World Casting Production, EUA, 2010.

RIBEIRO, R.A.C. *Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais metal – mecânicos*. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

ROSSITTI, S. M. *Processos e variáveis de fundição*. Grupo Metal, maio de 1993.

SANTOS, A.M.M.; BURITY, P. Complexo Automotivo. *BNDES 50 anos: histórias setoriais*. Rio de Janeiro, 2002, p. 101-127.

SOARES, Glória Almeida. *Fundição – mercado, processos e metalurgia*. Rio de Janeiro: Coppe, 2000.