

## Molde para fundição de alumínio sob pressão

*A aplicação de peças em alumínio injetado vem apresentando um crescimento constante nos mais variados setores produtivos, com destaque para a indústria automotiva. A observância de critérios corretos de construção e utilização dos moldes e de boas práticas no processo de injeção são fatores chave para a produtividade e rentabilidade do negócio. O artigo traz dicas importantes para atingir estes objetivos.*

Por **João Carmo Vendramim**

A utilização de metais leves na fabricação de veículos automotivos no Brasil cresce a cada ano, principalmente aqueles baseados em ligas de alumínio. Reduzir o peso dos veículos, economizar combustível e melhorar desempenho seriam os principais vetores para a substituição de ligas ferrosas por magnésio e inúmeras ligas de alumínio com melhores propriedades mecânicas, assim como o desenvolvimento de modernos processos de fundição, destacando-se o processo “sob pressão” em volume de peças produzidas. Peças para carros, caminhões e motocicletas como blocos de motor, carcaças de câmbio, *carters*<sup>1</sup>, e outros componentes automotivos vêm recebendo um aumento da participação de ligas de alumínio e ou magnésio [1].

Esses componentes em metais leves são produzidos nos moldes construídos em ligas ferrosas especiais para suportar altas temperaturas de processos como injeção “por gravidade”, “sob alta pressão” e “sob baixa pressão”, mantendo e reproduzindo a qualidade do produto injetado. Os moldes são em aços da classe “trabalho a quente” que permitem produções de maior volume, peças mais uniformes e com tolerâncias dimensionais mais “fechadas”, acabamento superficial superior e melhores propriedades mecânicas a custos relativamente baixos. O processo de fundição sob pressão tem sido mais amplamente utilizado, pois permite alta produção de peças com geometrias complexas. As taxas de produção podem alcançar, em casos especiais, 200 peças por hora em lotes ultrapassando 200.000 peças para um mesmo molde permanente e, por conta disto, busca-se aperfeiçoamento contínuo deste quanto ao projeto, material, máquina de injeção, processos térmicos e termoquímicos e, principalmente, das condições de utilização.

O desgaste e falhas desses moldes são perdas significativas para a indústria de fundição sob pressão. As principais causas de falhas nos moldes são agarramento da liga fundida, corrosão, erosão e fadiga térmica [2], além de outras relacionadas a falhas de projeto, máquina de injeção mal dimensionada, má utilização e manutenção.

Este texto discute aspectos principais da boa construção de um molde de injeção de alumínio em liga ferrosa para utilizar na operação industrial de fundição sob pressão.

### MECANISMOS DE FALHAS

#### Fadiga Térmica

Os moldes utilizados em fundição sob pressão estão sujeitos a tensões cíclicas induzidas por gradientes térmicos e pressão de operação que podem causar fraturas na superfície [3]. Durante o ciclo de injeção a liga de alumínio fundido no contato com a superfície do molde desenvolve um alto gradiente de temperatura entre a superfície e o centro (substrato) frio. Isso produz tensões na superfície que associadas a pressões de operação de 50 a 80 MPa<sup>2</sup>, podem causar deformações elásticas e plásticas levando à formação de rede de trincas superficiais chamadas “trincas térmicas”. Essas trincas são reproduzidas na superfície das peças injetadas e produzem deterioração crescente da qualidade destas, além da possibilidade de se propagarem levando à formação de trincas catastróficas [4].

A formação de trincas térmicas é retardada em aços com: elevada tensão de escoamento; tenacidade; ductilidade em altas temperaturas; alta condutividade térmica; e microestrutura homogênea obtida de um processo controlado de têmpera<sup>3</sup> e revenimentos<sup>4</sup> [3, 5]. A temperatura da superfície é o principal parâmetro que influencia a vida útil do molde de aço devido ao surgimento de tensões térmicas (gradiente de temperaturas).

<sup>1</sup> **Cárter:** É um recipiente metálico que protege e assegura a lubrificação de certos mecanismos [wikipedia.org].

<sup>2</sup> **Pascal:** Blaise Pascal (nasceu em Clermont-Ferrand, 19 de junho de 1623 – faleceu em Paris, 19 de agosto de 1662). Foi físico, matemático, filósofo moralista e teólogo francês. Estabeleceu o princípio de Pascal que diz: em um líquido em repouso ou equilíbrio, as variações de pressão transmitem-se igualmente e sem perdas para todos os pontos da massa líquida. Na Mecânica é homenageado com a unidade de tensão mecânica (ou pressão) denominada de **Pascal** (1Pa = 1 N/m<sup>2</sup>; 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup> = 1 bar; 1 MPa = 1.000 Pa) [wikipedia.org].

<sup>3</sup> **Têmpera:** Tratamento térmico caracterizado pelo resfriamento em velocidade superior a velocidade crítica de têmpera de uma liga ferro-carbono, a partir de uma temperatura acima da zona crítica para os aços hipoeutetóides e geralmente dentro da zona crítica para os aços hipereutetóides, resultando em transformação da austenita em martensita.

<sup>4</sup> **Revenimento:** É um processo feito após o endurecimento por têmpera. Peças que sofreram têmpera tendem a ser muito quebradiças. A fragilidade é causada pela presença da martensita. A fragilidade pode ser removida pelo revenimento. O resultado é uma combinação desejável de dureza, ductilidade, tenacidade, resistência e estabilidade estrutural. As propriedades resultantes do revenimento dependem do aço e da temperatura do revenimento [cimm.com.br].

Uma diferença de temperatura na superfície de  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  pode diminuir a vida útil do molde até em 50%. Essa temperatura condiciona o surgimento e a propagação das trincas no contorno de grão da superfície que se somaria à oxidação<sup>5</sup>. Por exemplo, uma trinca de profundidade da ordem de 0,15 mm pode estar formada à temperatura de  $690^{\circ}\text{C}$  com apenas 500 peças injetadas, ou surgir depois de 7.000 peças injetadas quando à temperatura de  $550^{\circ}\text{C}$  [5].

## Desgaste

O desgaste é a perda de material de um corpo devido a movimentos relativos em sua superfície. A superfície do molde de fundição sob pressão pode apresentar desgaste associado à adesão (solda) e erosão (corrosão). A erosão é causada pelas altas velocidades com que o metal fundido colide com a superfície do molde. A cavitação<sup>6</sup> do alumínio no estado líquido em alta velocidade reduz a pressão, vaporiza, produz bolhas no interior do fluxo que implodem quando reduzida a pressão e cria ondas de choque danificando a superfície. A cavitação e o arraste mecânico da superfície devido a uma alta velocidade de injeção, que pode chegar a 60 m/s, fazem com que a superfície do molde seja lavada para fora com o metal fundido [2].

Adesão e corrosão da superfície do molde originam-se pela interação química decorrente da interdifusão de átomos do aço do molde e da liga de alumínio que resulta na formação de compostos intermetálicos de alumínio, ferro e elementos de liga gerando agarramento da peça durante a extração [2]. Todos esses fenômenos estão associados a:

- Temperatura muito alta do alumínio;
- Posicionamento (incorreto) dos canais de refrigeração;
- Ciclo rápido (tempo de injeção);
- Desmoldante insuficiente;
- Temperatura do preaquecimento do molde muito alta;
- Projeto de localização do *gate*<sup>7</sup> de entrada de maneira não favorável ao melhor escoamento do metal líquido;
- Baixa qualidade de acabamento superficial do molde.

O desgaste pode estar associado também ao desenvolvimento de trincas térmicas e, geralmente, tem relação com:

- Temperatura desfavorável da superfície da cavidade;
- Posicionamento e dimensão incorreta do canal de refrigeração;
- Tipo e temperatura do meio de resfriamento;
- Temperatura da liga fundida;
- Velocidade da liga fundida muito elevada na cavidade;
- Impacto vertical da liga fundida na cavidade, machos e cantos próximos aos canais de entrada;
- Ciclo de injeção (rápido ou curto).

Todos esses mecanismos citados acima podem estar presentes no molde sendo um ou outro, em maior evidência em função do projeto de construção, tipo de material, processos térmicos e termoquímicos e, principalmente, condições de utilização.

## PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MOLDE

Muitos fatores afetam a vida em fadiga da superfície do molde de aço no processo de fundição de alumínio sob pressão e os principais são:

- Temperatura do molde;
- Propriedades mecânicas do aço;
- Temperatura de fusão do alumínio.

Os fabricantes de aços investem permanentemente em tecnologias de fundição para obter estes com elevada pureza (reduzidas micro inclusões e impurezas de enxofre e fósforo, por exemplo), microestrutura homogênea e

<sup>5</sup> **Oxidação:** antigamente, o termo oxidação significava combinar-se com o oxigênio. Quando se adquiriu o conhecimento da estrutura dos átomos verificou-se que, quando um elemento ou uma substância combinava-se com o oxigênio, perdia elétrons. Atualmente, o termo significa perder elétrons, não necessariamente em presença de oxigênio.

<sup>6</sup> **Cavitação:** É um fenômeno originado em quedas repentinas de pressão, geralmente observado em sistemas hidráulicos. A combinação entre a pressão, temperatura e velocidade resulta na liberação de ondas de choque e microjatos altamente energéticos, causando a aparição de altas tensões mecânicas e elevação da temperatura, provocando danos na superfície atingida [wikipedia.org].

<sup>7</sup> **Gate:** do inglês, passagem, porta de acesso. Também denominado de ataque, é a seção que interliga canal de injeção e peça e por onde a cavidade é alimentada (preenchida).

isotropia<sup>8</sup> para algumas propriedades mecânicas na aplicação de injeção de alumínio sob pressão visando o melhor desempenho (maior “vida útil”).

Ao final da construção do molde as relevantes operações industriais de têmpera e revenimentos são realizadas para modificar e adequar corretamente as propriedades mecânicas do aço. Os processos térmicos são tão importantes quanto a correta seleção do tipo de aço e, principalmente, projeto do molde. Os processos térmicos de aços para moldes de injeção e também da operação industrial de forjamento a quente devem obedecer à norma americana de sigla NADCA (*North American Die Casting Association* - Associação Norte Americana de Fundição) [9] que estabelece critérios para o aquecimento, manutenção à temperatura de austenitização<sup>9</sup> e taxas de resfriamento. A figura 1 mostra molde e equipamento utilizado para a têmpera, neste caso, tecnologia a vácuo.

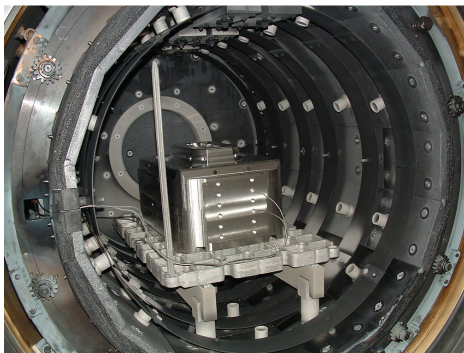


Figura 1 – Molde montado dentro do forno de têmpera à vácuo [Foto cedida por Isoflama, Indaiatuba, SP]

A seguir, as principais propriedades mecânicas do aço do molde modificadas pela têmpera e revenimento.

### Resistência ao amolecimento pelo calor

O aço do molde precisa apresentar resistência ao início da trinca térmica por deformação plástica em alta temperatura (resistência ao amolecimento, ou ao re-revenimento). Em outras palavras, é a capacidade do aço em sustentar a dureza original em um tempo longo a elevadas temperaturas [8].

A resistência à propagação da trinca a quente está associada ao limite de escoamento e a tenacidade. Em altas temperaturas é fundamental que o aço mantenha a resistência mecânica e não sofra queda na dureza. Os aços da classe “trabalho a quente” apresentam, em função da composição química, diferentes comportamentos para a dureza em alta temperatura. Para o molde, é interessante utilizar um tipo de aço que mostre maior resistência a esta propriedade, dependendo da situação de injeção, como no caso de peças de paredes grossas e em contato com o alumínio líquido por muito tempo. Os fabricantes de aços para essa aplicação e literaturas técnicas disponibilizam as informações para essa propriedade de todos os aços da classe trabalho a quente. Relevante, nesse caso, conhecer o coeficiente de transmissão de calor e de expansão térmica do aço a ser utilizado.

### Ductilidade

Propriedade importante para o bom desempenho do aço do molde. Ductilidade pode ser definida como a capacidade do aço acumular deformação plástica antes da fratura [6]. Um maior nível de ductilidade do aço contribui para estender a vida útil devido deter o início e crescimento da trinca por fadiga térmica. A homogeneidade de microestrutura, isotropia e pureza do aço concorrem para a máxima ductilidade. Os processos controlados de fabricação de aço e tecnologias como ESR<sup>10</sup> e VAR<sup>11</sup>, por exemplo, e na sequência tratamento térmico de homogeneização do lingote e adequado forjamento contribuem para a obtenção da melhor ductilidade.

<sup>8</sup> **Isotropia:** do grego *isos* = igual e *trapos* = girar. Propriedade que caracteriza as substâncias que possuem as mesmas propriedades físicas independentemente da direção considerada (três direções).

<sup>9</sup> **Austenitização:** Transformação da estrutura da matriz existente em estrutura austenítica através de aquecimento. Pode ser parcial (aquecimento dentro da faixa de transformação) ou completa (aquecimento acima da faixa de transformação). A estrutura austenítica é formada por austenita, que é a fase do aço cúbica de face centrada (CFC), com boa resistência mecânica, apreciável tenacidade, amagnética e com solubilidade máxima de carbono de 2%.

<sup>10</sup> **ESR:** do inglês *Electroslag Remelting* significa refusão por eletroslag. Também conhecido como *Electro-Flux Remelting*, é um processo de refusão e refino do aço e outras ligas para aplicações críticas como aeroespacial, aeronáutica, usinas térmicas, plantas nucleares, tecnologia militar e outras.

<sup>11</sup> **VAR:** do inglês *Vacuum Arc Remelting* significa refusão a arco em vácuo.

## Tenacidade

A tenacidade para o aço da classe trabalho a quente, que é submetido a tensões dinâmicas, é a capacidade de aliviar os “picos de tensões” por deformações plásticas localizadas, prevenindo à formação de trincas. Tenacidade é termo genérico para a resistência do aço a uma falha, ou nucleação de fratura. É a propriedade de o aço absorver a energia até a fratura, ou a capacidade do aço absorver a energia na região plástica, isto é, mede a energia necessária para romper [3]. Essa energia pode ser medida e neste caso seria a área total sob a curva “tensão-deformação” de um corpo de prova de aço no ensaio de tração.

A propriedade tenacidade é incrementada com a microestrutura uniforme, carbonetos finos esferoidizados, redução de segregações e a menor presença de inclusões de óxidos, sulfetos, fósforos e carbonetos. Para o aço da classe trabalho a quente do molde de injeção, este deve apresentar a melhor combinação de resistência mecânica e tenacidade.

## Resistência à erosão por ataque químico do alumínio

O alumínio fundido contribui para uma elevada erosão da superfície do molde de aço e, em função disto, este deve apresentar boa resistência ao desgaste. Além da reação química do alumínio e a superfície do molde, outros fatores contribuem para esse tipo de desgaste, tais como a temperatura do alumínio fundido, pressão de injeção, lubrificante/desmoldante insuficiente, tempo de injeção, posicionamento dos canais de refrigeração (projeto), localização do *gate*, velocidade de injeção, dureza do aço e, finalmente, aumento da temperatura devido a alta fricção.

## Propriedades da superfície

Os processos térmicos de têmpera e revenimentos modificam e adequam as propriedades mecânicas do aço, em geral. Processos termoquímicos e/ou revestimentos duros, podem ser realizados para melhorar a vida útil do molde.

Assim, em razão das severas condições da injeção de alumínio, para determinadas situações, pode ser necessário melhorar as propriedades mecânicas exclusivamente da superfície do molde. Nesses casos é comum a utilização de processos de difusão de nitrogênio industrialmente conhecidos como nitretação que endurecem a superfície do aço, reduzem a ductilidade e a aderência da superfície e protegem contra a erosão, principalmente quando crescem a operação industrial de oxidação para a formação de uma fina camada de óxidos tipo magnetita, preferencialmente, sobre a camada nitretada. Além disso, a alta estabilidade química e térmica da camada formada aliada à baixa porosidade, ou nenhuma se processo de nitretação a plasma, bloqueiam a difusão de átomos do molde para a liga de alumínio, e vice-versa, impedindo a formação de compostos intermetálicos e, conseqüentemente, minimizando o agarramento [10]. E ainda pode ser utilizado, dependendo das características de injeção, somente o processo de oxidação para formar uma fina camada de óxidos tipo magnetita de espessura entre 0,0015 e 0,0035 mm [11].

O processo de difusão de átomos de nitrogênio produz uma fina camada de nitrogênio dissolvido na matriz ferrítica do aço do molde com concomitante endurecimento advindo da precipitação de nitretos baseados em elementos de liga fortes formadores de nitretos. O incremento de volume decorrente da introdução de nitrogênio produz tensões de compressão junto à superfície da peça, e o aumento de dureza melhora a resistência ao desgaste. O endurecimento baseado na precipitação de nitretos aumenta a resistência ao revenido (resistência ao amolecimento a quente), retardando a nucleação precoce de trincas associadas à fadiga térmica. Contudo, uma vez a trinca iniciada esta avança rapidamente por toda extensão da camada nitretada e pára somente quando alcança a região de maior tenacidade do aço. A propagação da trinca aguda a partir desse ponto será por acúmulo de deformações plásticas e isto pode representar intervalos de alguns milhares de peças injetadas.

A espessura da camada nitretada deve ser de pequena extensão e morfológicamente adequada. Para ilustração, a figura 2 mostra uma superfície nitretada de aço classe trabalho a quente caracterizada por microscopia ótica (a) e o respectivo gradiente de microdureza (b). Nesse caso, a camada nitretada mostrou profundidade de 0,051 mm na inspeção por microscopia ótica e 0,06 mm na medição por microdureza, conforme norma DIN<sup>12</sup> 50190. A dureza do núcleo desse corpo de prova (*padrão utilizado temperado e revenido, dureza 50 HRC*<sup>13</sup>) em aço é da ordem de 510 HK<sup>14</sup>0,5 e a superfície com 1211 HK0,2.

<sup>12</sup> *DIN*: do alemão *Deutsches Institut für Normung* (Instituto Alemão para Normatização) é a organização nacional na Alemanha para padronização, representante da *International Standardization Organization* (Organização Internacional para a Padronização – ISO) no país.

<sup>13</sup> *Dureza Rockwell*: é um método de medição direta de dureza desenvolvido por Stanley Pickett Rockwell em 1922, nos Estados Unidos. É um dos mais utilizados em indústrias e um dos mais simples e que não requer habilidades especiais do operador. Além disso, várias escalas diferentes podem ser utilizadas através de possíveis combinações de diferentes penetradores e cargas, o que permite o uso deste ensaio em praticamente todas as ligas metálicas, assim como em muitos polímeros. Sua unidade é HRC.

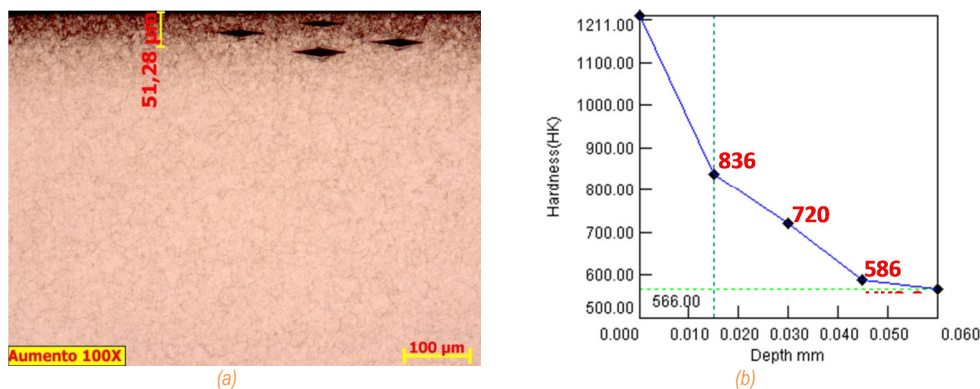


Figura 2 – (a) Microscopia ótica da superfície nitretada; (b) Curva de microdureza HK0,3 [Imagens cedidas por Isoflama, Indaiatuba, SP]

A aplicação de revestimentos duros obtidos por processos PVD<sup>15</sup> e tipos TiN, TiCN, AlTiN e AlTiCrN tem sido utilizada, pois aumenta o rendimento do molde devido às características mecânicas destes, tais como boa adesão ao substrato e baixa diferença de coeficiente de expansão térmica com o substrato, minimizando a possibilidade de trincas na interface substrato-revestimento [2]. Pesquisas recentes apontam ainda para um aperfeiçoamento em engenharia de superfície combinando os processos de nitretação e revestimento duro por PVD que é conhecido como “processo duplex”.

## PROJETO DO MOLDE

Uma das principais etapas da construção do molde de injeção é a formatação do projeto e as rotas de usinagem, pois a próxima etapa será a realização dos processos de têmpera e revenimentos do aço que são operações de elevados riscos para produzir deformação e trinca. Literaturas técnicas específicas devem ser consultadas para a correta elaboração do projeto do molde antes do processo de têmpera, reduzindo assim os riscos de não conformidade na têmpera para níveis mínimos.

A seguir, algumas recomendações gerais para projeto e prevenção na têmpera:

- Evitar grandes variações de massa e cantos vivos (produzir fartos raios);
- Evitar extrair aço por usinagem em áreas críticas que poderiam sofrer usinagem posterior, ou partes substituídas por insertos;
- Utilizar rotas de fresa para produzir tensões compressivas na superfície;
- Executar canal de refrigeração de forma a garantir máxima uniformidade de temperatura do molde em operação de injeção;
- Atender às recomendações dos manuais para as distâncias dos canais à superfície de trabalho; e localização dos “gate”;
- Gerar a menor rugosidade possível;
- Dimensionar o molde adequado à força de fechamento da máquina de injeção sob pressão;
- Executar operação de acabamento para dimensões finais por usinagem *high speed*<sup>16</sup> ou por eletroerosão. O processo de eletroerosão pode produzir extensas áreas com “camada branca” (fina camada de elevada dureza, não revenida) que deve ser removida mecanicamente e, em seguida, realizar alívio de tensão;
- Realizar processo termoquímico de nitretação depois do molde finalizado e testado com a produção de pequenas quantidades de peças (lote piloto). Fundamental tomar todos os cuidados operacionais no estágio

<sup>14</sup> **Dureza Knoop:** o método Knoop é utilizado para a medição de dureza sobre áreas muito pequenas, microdureza, na qual um penetrador de diamante, com formato piramidal, é pressionado contra uma superfície devidamente polida. Este método foi desenvolvido no National Bureau of Standards (hoje NIST), pelo físico e engenheiro americano Frederick Knoop e é normalizado pela ASTM D1474. Tanto a dureza Vickers como a Knoop são métodos de ensaio de microdureza, porém o último pode ser usado para materiais frágeis, como os cerâmicos [wikipedia.org].

<sup>15</sup> **PVD:** do inglês Physical Vapour Deposition, significa deposição física de vapor. Trata-se de um processo descoberto acidentalmente por Faraday, que observou a deposição de partículas na superfície interna de bulbos de lâmpadas incandescentes oriundas da explosão do filamento. O processo consiste de deposição em vácuo onde, primeiramente, um material é transformado em vapor, então é transportado nessa fase e por último é depositado na superfície de um substrato. Este processo permite depositar uma infinidade de metais puros e ligas (como ouro, cromo, e outros) bem como uma série de nitretos e outros compostos.

<sup>16</sup> **HSM:** do inglês High Speed Machining significa Usinagem à altas velocidades. É também denominada como HSC (High Speed Cutting – Corte em alta velocidade). Trata-se de uma tecnologia de usinagem não convencional em que fatores como máquina, ferramenta de corte, material e forma da peça a ser usinada, além do próprio processo a ser elaborado, interagem com o objetivo de obter resultados específicos nas operações de usinagem, de maneira muito mais rápida. Apresenta como principal vantagem a possibilidade de trabalhar com velocidades de corte cinco a dez vezes maiores do que as normalmente utilizadas e com avanços e profundidades de corte também bastante menores do que aqueles adotados em usinagens convencionais e permite trabalhar com menor geração de tensões na superfície da peça usinada.



de teste (*tryout*) para não destruir a superfície de trabalho do molde. O processo de nitretação a seguir requer “limpeza especial” da superfície para produzir uma morfologia adequada de fina camada nitretada.

Uma vez o molde concluído e finalmente pronto para entrar em produção ainda seriam necessários importantes cuidados na operação de injeção para manter o bom desempenho deste, como descritos a seguir:

- Mandatório um correto pré-aquecimento para iniciar a operação (em torno de 300°C). Geralmente, preferível utilizar sistemas de aquecimento por indução. Aquecer com maçarico na lateral do molde seria aceitável, jamais direto na área de trabalho;
- Aliviar tensão do molde quando concluída a injeção de 5% da quantidade prevista de peças;
- Utilizar lubrificante/desmoldante conforme recomendação de fabricante;
- Manter molde aquecido ( $\pm 150^{\circ}\text{C}$ , em estufa) se parada prolongada de produção;
- Manutenção com solda: a quente e seguir a recomendação de fornecedor de eletrodo;
- Evitar alta temperatura do alumínio fundido para não produzir re-revenimento do aço na superfície.

## CONCLUSÃO

Os moldes para injeção de alumínio sob pressão são ferramentas de alto valor agregado e em razão disto o desgaste e falhas prematuras representam perdas consideráveis para a indústria de fundição. A ação sinérgica de fatores como o tipo adequado de aço, projeto, usinagem, processos térmicos, *tryout*, processos termoquímicos, máquina de injeção adequada e em boas condições, e a correta utilização do molde resultam na maximização do desempenho do molde.

Todas as empresas e os profissionais envolvidos nessa cadeia produtiva de moldes para injeção de alumínio sob pressão estão comprometidos com os melhores resultados e não medem esforços para alcançá-los.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Jan Vataku, da Universidade Mackenzie e ao Engenheiro Edson Canova, Consultor Técnico para aços ferramentas, pela revisão deste texto.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Vendramim, JC; Enokibara, F.; *Considerações sobre a vida útil de moldes para fundição de alumínio sob pressão*. Informe técnico Isoflama, 2008;
- [2] Mitterer, C.; *Application of hard coating in aluminum die casting, soldering, erosion and thermal fatigue behavior*. Surface and Coatings Technology 125, páginas 233-239, 2000;
- [3] Essadiqi, E.; Totten, G.; *Tool steels*, Cannaet – MTL, Materials technology laboratory. In: Steel Heat Treatment Handbook, second edition, CRC press, 2006;
- [4] Srivastava, A.; Joshi, V.; Shivpuri, R.; *Computer modeling and prediction of thermal fatigue cracking in die casting tooling*. Wear 256, p.38-43, 2004;
- [5] Lindow, H.; *Ações para prevenção de falhas prematuras em fundição sob pressão*. Informe técnico Uddeholm, 2003;
- [6] Cornacchia, G. et al.; *Influence of aging on microstructure and toughness of die casting die steels*. University of Brescia, Itália;
- [7] Ferreira, I.; *Propriedades mecânicas dos metais*. Unicamp, 2001;
- [8] Hall, L.; Vlack, V.; *Princípios de ciências dos materiais*. Editora Edgard Blücher, 2000;
- [9] NADCA; *Five steps to improving die performance*; <[www.diecasting.org](http://www.diecasting.org)>;
- [10] Mitterer, C. et al.; *Industrial applications of PACVD hard coatings*, Surface and Coatings Technology, 163-164; páginas 717-722, 2003;
- [11] Haikai; Técnico 047 – Processo IsoX<sup>®</sup> – Isoflama, 2014.

**João Carmo Vendramim** (vendramim@isoflame.com.br)

