

COMPARATIVO DE PROCESSOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS DE MOLDES E FERRAMENTAS (1)

Shun Yoshida (2)

Resumo

Os processos de tratamentos térmicos de moldes e ferramentas, especialmente no caso da tempera, tem particularidades que não existem nos tratamentos de aços comuns, a saber: exigências mais controladas de propriedades mecânicas, tolerâncias dimensionais mais apertadas, requisitos de acabamento superficial mais severos, entre outras necessidades, que, em geral podem ser negligenciadas nos tratamentos térmicos de aços comuns.

O equipamento utilizado, considerado parte integrante do processo de tratamento térmico, interfere nos resultados de tratamento térmico, na medida em que há diferenças entre os diversos tipos de equipamento, tanto no aspecto construtivo como no operacional.

O artigo discute essas diferenças entre os diversos equipamentos, apontando as vantagens e desvantagens de cada um deles.

-
- (1) Trabalho a ser apresentado no SEGUNDO ENCONTRO DA CADEIA DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES, ABM - Assoc. Brasileira de Metalurgia e Materiais, de 21 a 23/09/2004, S.Paulo, SP, Brazil.
 - (2) Engenheiro Metalurgista, membro da ABM, Coordenador de Tratamentos Térmicos de Ferramentas da BRASIMET COM . IND. S.A.

A Tempera de Moldes e Ferramentas

O objetivo fundamental do tratamento térmico, particularmente o processo de tempera, para moldes e ferramentas é a obtenção de uma combinação ideal de RESISTÊNCIA MECÂNICA E TENACIDADE.

Um molde de injeção plástica, por exemplo, necessita uma boa resistência mecânica, suficiente para que não ocorra “amassamento” durante a injeção, e, ao mesmo tempo não “frature” em trabalho, ou seja, não sofra trincas, o que implica alta tenacidade.

Em punções e matrizes para estampagem de chapas de aço, é necessária uma boa tenacidade, para que o punção, p.ex., não quebre em trabalho, e, ao mesmo tempo, a resistência mecânica deve ser elevada, para que as bordas cortantes não percam o fio de corte com pouco tempo de uso.

RESISTÊNCIA A DESGASTE, não é, a priori, objetivo do tratamento térmico de tempera, uma vez que, sendo o desgaste um fenômeno de superfície, é assunto para a Engenharia de Superfícies, com revestimentos e/ou tratamentos superficiais.

Por outro lado, para moldes e matrizes, o tratamento térmico deve ser tal que estenda seu efeito por toda a massa da ferramenta, ou seja, as diferenças de propriedades entre superfície e núcleo devem resultar as menores possíveis.

Sendo o tratamento térmico um processo, fundamentalmente, de modificações microestruturais, isso significa que a microestrutura resultante deve ser a mais homogênea possível, entre a superfície da ferramenta e o núcleo.

A fig. 1 a seguir, resume os efeitos dos tratamentos térmicos.

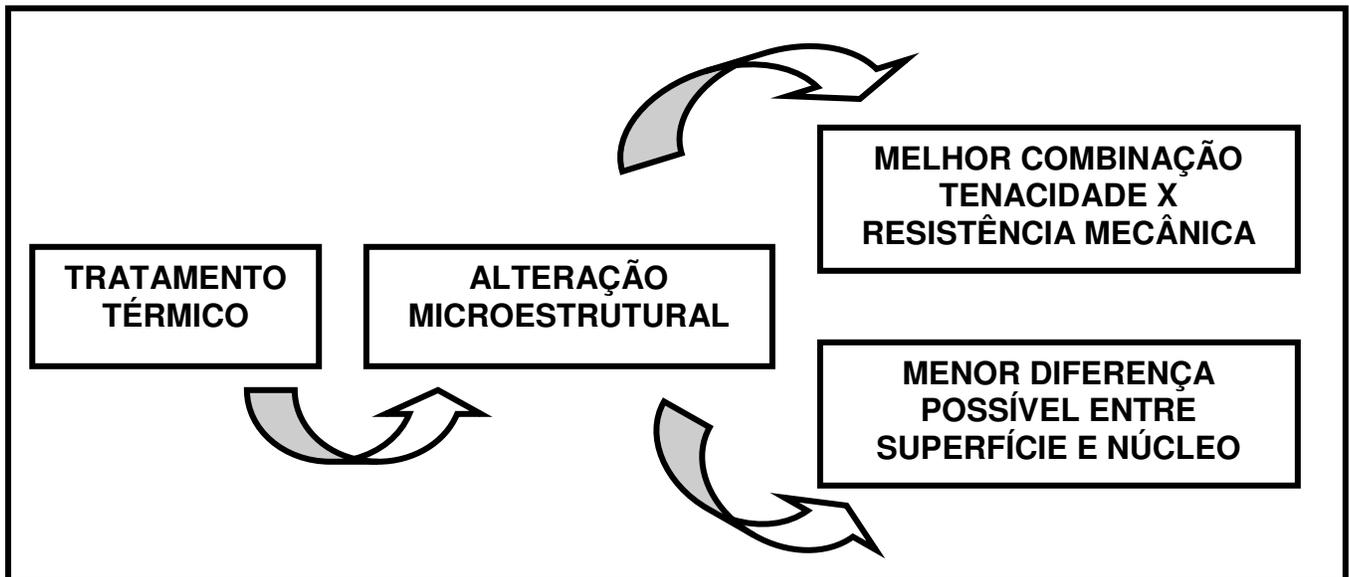


Fig.1: Objetivo fundamental dos tratamentos térmicos (BRASIMET)

Combinar a necessidade de conciliar propriedades mecânicas, a priori, antagônicas como Tenacidade e Resistência Mecânica, com o imperativo de manter as menores diferenças possíveis entre o núcleo e a superfície, não é uma tarefa simples.

Para que tais objetivos sejam atingidos, é imprescindível que superfície e núcleo atinjam as temperaturas projetadas para o tratamento térmico, e, mais importante, que fiquem por tempo suficiente para que as transformações ocorram.

Na prática, o núcleo sempre “esquenta” mais lentamente que a superfície no aquecimento, e “resfria” mais lentamente no resfriamento, ou seja, sempre haverá diferenças microestruturais num processo de tempera na prática.

Assim, como requisito fundamental para o bom tratamento térmico, podemos eleger um conjunto CICLOXEQUIPAMENTOXCONTROLES que permita reduzir a um mínimo possível as diferenças entre superfície e núcleo, garantindo que ambos atinjam as temperaturas necessárias e também, que fiquem pelo tempo necessário.

Observe-se que a prática de super dimensionar os tempos do ciclo de tratamento térmico, visando equilibrar as temperaturas de núcleo e superfície, é temerária e perigosa, pois tempos excessivos podem causar crescimento no tamanho de grão resultante, com conseqüente fragilização do aço.

Em termos de ciclo de tratamento térmico, de um modo geral, uma vez conhecida a aplicação da ferramenta, e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas desejadas, e selecionado o aço ferramenta que vai ser utilizado, o ciclo fica praticamente definido.

A tabela 1 a seguir, ilustra uma situação de alteração de ciclo de tratamento térmico, em função da aplicação da ferramenta.

		Caso A	Caso B
Ferramenta		Punção de Repuxo	Punção de Repuxo
Aplicação		Estampagem de chapas de aço carbono	Estampagem de chapas de aço carbono
Aço Selecionado		AISI D2	AISI D2
Processo Produtivo		Prensa excêntrica, golpe único	Prensa excêntrica, golpe único
Espessura de chapa		≤ 1,0 mm	≥ 2,5 mm
Padrão de Tratamento Térmico	AUSTENITIZAÇÃO	1030 °C	1050 °C
	REVENIDO	2 x 180 °C	2 x 520 °C
	DUREZA RESULTANTE	60/62 HRC	58/60 HRC

Tab. 1: Alteração de ciclo de Tratamento Térmico em função da Aplicação (Fonte: Engenharia BRASIMET).

Note-se, na tabela 1, que a única diferença entre os casos A e B é a espessura da chapa a ser estampada. Espessuras maiores, implicam maiores exigências quanto à TENACIDADE. Assim, para o mesmo aço, foram projetados dois tipos de ciclo de tratamento térmico, sendo que o caso B, beneficia a Tenacidade, em ligeiro detrimento da Resistência Mecânica.

Entretanto, percebe-se que, uma vez definido o ciclo correto, em função da aplicação, fica no EQUIPAMENTO DE TRATAMENTO TÉRMICO, e nas

possibilidades de controle que ele permite, a chave para o sucesso do tratamento, ou, em outras palavras, o objetivo de conciliar a melhor combinação de propriedades mecânicas com a menor diferença microestrutural entre superfície e núcleo da ferramenta, passa pela escolha do melhor equipamento.

EQUIPAMENTOS DE TRATAMENTO TÉRMICO

Para todos os efeitos, a discussão conduzida neste texto vale para qualquer tipo de tratamento térmico de aços ferramentas, mas para facilidade didática, vamos discutir o caso particular da tempera, que, de resto, também é a mais crítica em termos do requisitos discutidos no capítulo anterior.

A fig 2 ilustra um ciclo genérico para tratamento de tempera de aços ferramenta.

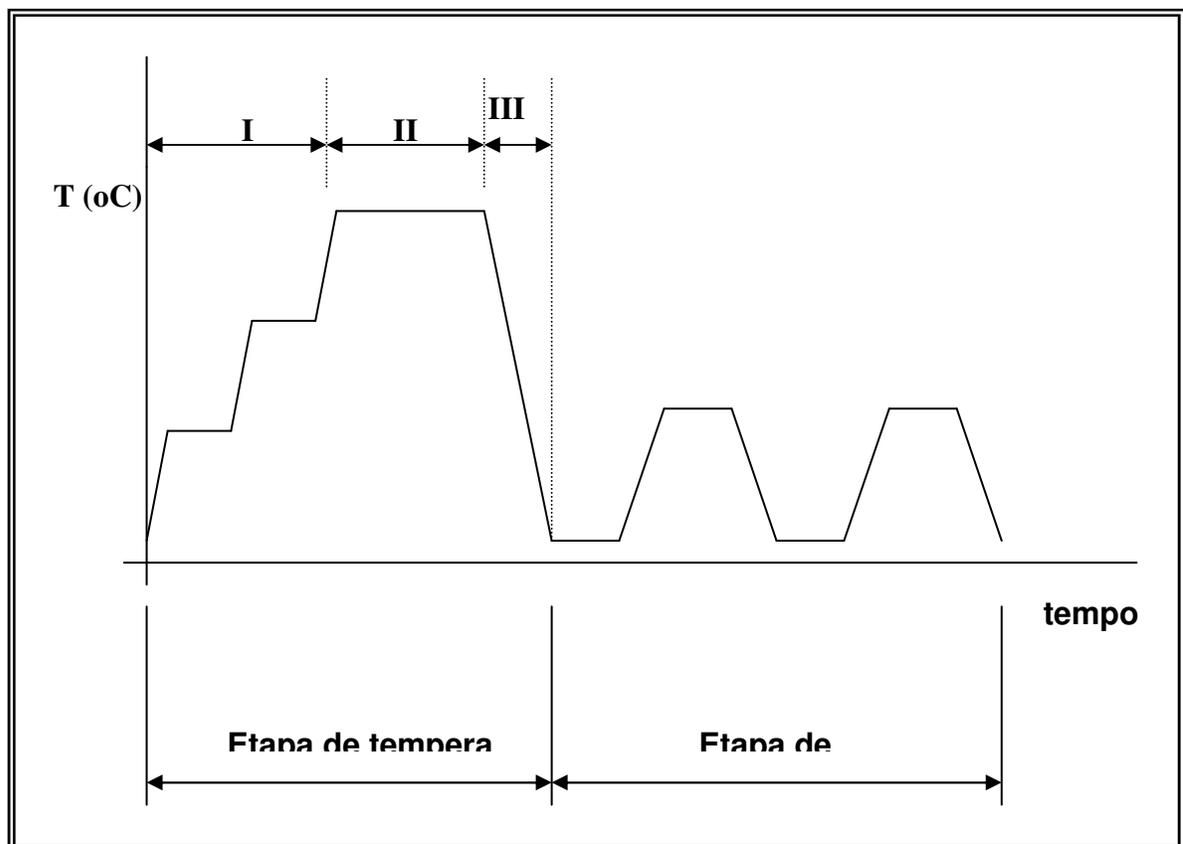


Fig. 2: ciclo genérico do tratamento de tempera de um aço ferramenta (BRASIMET)

Vamos tratar, neste texto, como tempera, um ciclo completo, incluindo-se aí os revenidos (que, para aços ferramenta, em geral são múltiplos).

Na etapa de tempera propriamente dita, temos três fases:

I – PRÉ AQUECIMENTO: etapa importante para prevenção de distorções dimensionais, além de ser uma precaução adicional contra trincas de tratamento térmico. Essa etapa deve ser programada para que a peça, como um todo, atinja a temperatura de austenitização em tempos próximos. O principal é controlar o aquecimento de modo a que não seja rápido demais, que possa provocar grandes diferenças entre superfície e núcleo da ferramenta, nem lento demais, a ponto de prejudicar a produtividade.

II – AUSTENITIZAÇÃO: nessa etapa, inicia-se a transformação da microestrutura em AUSTENITA. É a última e mais importante etapa do aquecimento. É indispensável que haja um bom controle de temperaturas superfície e núcleo, de modo a GARANTIR que a peça, como um todo, tenha atingido a temperatura correta e esteja bem homogênea, antes de iniciar-se o resfriamento. Tempos excessivos nesta etapa tem risco potencial de provocar crescimento exagerado de grão, com conseqüente perda das propriedades mecânicas.

III – RESFRIAMENTO – é a etapa de tempera propriamente dita. Na realidade, o termo TEMPERA significa RESFRIAR. A velocidade dessa etapa é um fator crítico. Velocidades mais baixas que o mínimo, causarão heterogeneidades microestruturais importantes que poderão acarretar prejuízos nas propriedades mecânicas finais. Por outro lado, velocidades excessivas causam maiores distorções dimensionais, além de aumentar o risco de trincas.

De um modo geral, a ETAPA DE REVENIDO é sempre conduzida em outro equipamento, pois usa temperaturas mais baixas e também por questões de produtividade. Entretanto, também nessa etapa há fases de AQUECIMENTO, MANUTENÇÃO NA TEMPERATURA, e RESFRIAMENTO. Nessa etapa, o mais importante é, assim como na tempera, GARANTIR que a temperatura fique homogeneamente distribuída em toda a massa da peça, e os tempos sejam suficientes para que as reações desejadas ocorram.

Há uma infinidade de equipamentos para tratamentos térmicos, e vamos limitar este texto a equipamentos que permitam tempera de aços ferramenta, ou seja equipamentos que atinjam temperaturas elevadas (variando de 900 oC até 1200 oC), e tenham velocidades de aquecimento suficientes para garantir boa transformação em toda a massa da ferramenta.

Assim, a discussão será limitada aos seguintes equipamentos:

- FORNO SEM ATMOSFERA CONTROLADA E TEMPERA EM ÓLEO OU AR(fig.3);
- FORNO BANHO DE SAIS FUNDIDOS (fig.,4);
- FORNOS A VÁCUO (fig.5).



Fig.3: Ferramentas saindo de forno sem atmosfera controlada, para posterior tempera em óleo. (BRASIMET)

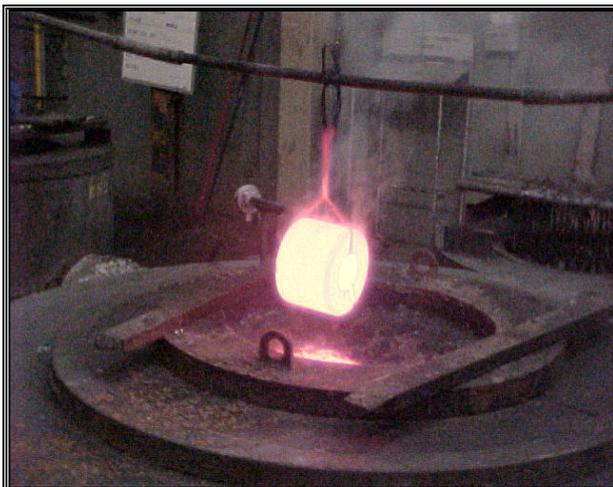


Fig.4: Ferramentas saindo de forno de BANHO DE SAIS FUNDIDOS, para posterior tempera. (BRASIMET)



Fig.5: Ferramentas sendo carregadas em forno a vácuo (BRASIMET)

FORNOS SEM ATMOSFERA CONTROLADA, PARA TEMPERA EM ÓLEO OU AR

Esse tipo de equipamento, de baixo custo e pouca manutenção, consiste num forno, com as características abaixo (fig.6):

- Atinge temperaturas até 1030 °C sem maiores problemas;
- Aquecimento por resistências elétricas (alguns tipos, a gás);
- O forno é carregado com carros, manuais ou elétricos, em função do tamanho. Para retirada, em geral, é necessária uma talha, para retirar as peças uma a uma;
- A atmosfera do forno é o próprio ar. Equipamentos maiores podem contar com ventiladores, para melhor distribuição do calor;
- O equipamento permite tempera em óleo ou ar, uma vez que basta carregar as peças para fora do forno após cumprido o ciclo de aquecimento. (fig.7)

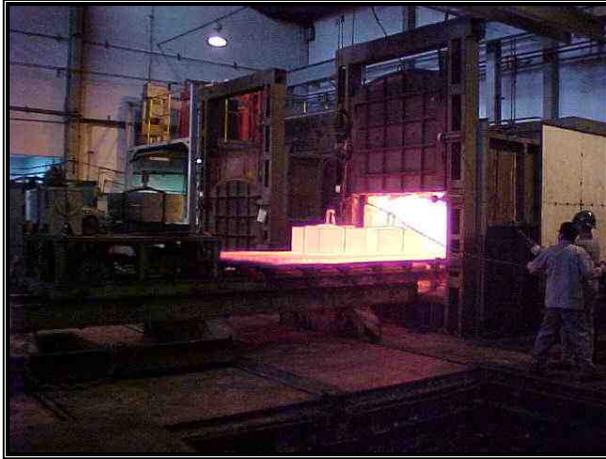


Fig. 6: Ferramenta em aço AISI H13, saindo do forno após austenitização, seguindo para tempera em óleo (BRASIMET)



Fig. 7: Mesma ferramenta da fig. 6, na seqüência entrando no óleo, para tempera (BRASIMET)

Independentemente do porte do forno, a seqüência do processo é sempre a mesma: carregamento do forno, aquecimento, austenitização, descarregamento, mergulho em óleo (ou resfriamento ao ar – fig.8).



Fig. 8: Ferramentas de grande porte (> 2000 kg), em aço AISI H13, sendo temperadas ao ar após saírem do mesmo forno da fig 6. (BRASIMET)

O uso desse tipo de equipamento, impõe alguns problemas, a saber:

- A ausência de uma atmosfera protetora, causa severa oxidação na superfície, levando a descarbonetação. A camada descarbonetada pode chegar a 0,5 mm;
- Não há possibilidade de controle da temperatura do núcleo nem da superfície. Esse tipo de equipamento é controlado por termopar diretamente na câmara do forno e não há meios práticos de montar “termopares de arraste”;
- Para fornos maiores, como o da foto, é muito difícil manter homogeneidade térmica no interior do forno, devido ao porte, e à ausência de recirculadores (fornos com recirculadores, em geral, são de menor porte);
- A movimentação da ferramenta à altas temperaturas, implica maiores distorções dimensionais, além de risco de segurança;
- No caso de resfriamento ao ar, é esperada uma grande diferença microestrutural entre superfície e núcleo, numa vez que o núcleo resfriará em velocidades muito menores que a superfície. Note na foto 8, que as extremidades da peça estão mais escuras que o restante da peça, evidenciando a heterogeneidade na velocidade do resfriamento;
- No caso de resfriamento em óleo, é necessária uma técnica especial, movimentando a ferramenta para dentro e para fora do óleo, até que a temperatura reduza a ponto de não haver mais riscos de trinca (esse ponto depende da experiência do profissional de tratamento térmico, não havendo nenhuma referência técnica mais segura);
- O resfriamento em óleo, devido à maior velocidade de extração de calor, produz uma transformação mais efetiva, e as diferenças microestruturais não serão tão acentuadas como no resfriamento ao ar, mas em compensação, as distorções dimensionais deverão ser substancialmente maiores;

- Igualmente à etapa de aquecimento, no resfriamento não há como controlar a temperatura do núcleo e da superfície, nem tampouco utilizar técnicas de interrupção de resfriamento, de modo a prevenir distorções dimensionais.

Em resumo, esse tipo de equipamento, NÃO permite um bom controle de temperaturas, nem tampouco a redução de diferenças microestruturais entre superfície e núcleo da ferramenta.

Na prática, esse tipo de equipamento somente deve ser utilizado se não houver outras opções que permitam maior controle e qualidade.

FORNO BANHO DE SAIS FUNDIDOS

A fig. 9 mostra um forno com banho de sais fundidos. Trata-se de um meio líquido, que tem por função transmitir o calor para a peça. Como o banho pertence ao grupo químico dos sais, não há reações de oxidação na interface banho/metal, e, pelo menos durante o processo, não há decarbonetação.



Fig.9: forno de banho de sais fundidos, para alta temperatura (até 1300 °C). Forno com aquecimento elétrico, controlado por termopar de imersão. (BRASIMET)

A seqüência do processo é ilustrada nas figuras a seguir:



Fig.10: Ferramenta em aço AISI O1, sendo retirada do forno de austenitização. Temperatura: 800 oC. Peso da ferramenta: 60 kgs. (BRASIMET)



Fig.11: Mesma ferramenta da fig. 10, sendo movimentada para escoamento do sal em excesso (BRASIMET)



Fig.12: Mesma ferramenta na seqüência, durante o transporte para o banho de resfriamento (BRASIMET)

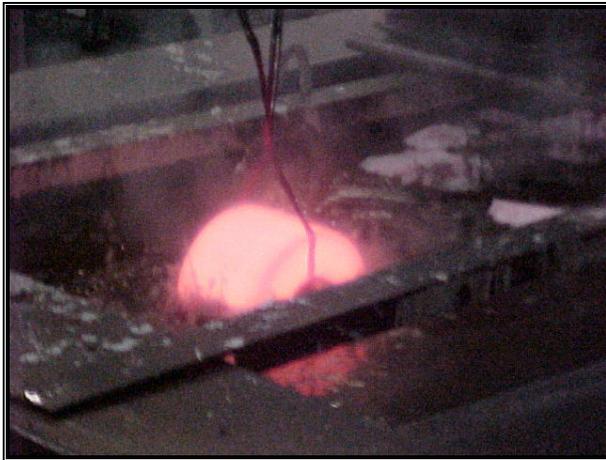


Fig.13: Mesma ferramenta, mergulhando no banho de resfriamento (temperatura do banho= 180 oC) (BRASIMET)



Fig.14: Fase final da tempera, com a ferramenta sendo movimentada no banho (note as partes escuras) (BRASIMET)

A priori, a única vantagem do processo usando banho de sais fundidos é a ausência de oxigênio durante a fase de aquecimento, o que limita a descarbonetação. A seguir, listamos os problemas que ocorrem com o uso deste tipo de equipamento.

- Cada banho tem uma temperatura fixa. Assim, para seqüências de preaquecimento com mais de uma temperatura, é necessário dispor de vários fornos;
- Cada transferência significa movimentar e expor a peça ao ar, o que implica risco de descarbonetação além de maiores distorções dimensionais;

- Ao mergulhar a peça no banho, necessariamente haverá diferenças nas taxas de aquecimento/resfriamento, uma vez que a parte da ferramenta que entra primeiro no banho, aquece/resfria mais rapidamente;
- Apesar de não haver descarbonetação, para aços ferramenta com teores de Cromo superiores à 5 % (por exemplo, no AISI D2, o teor de Cr gira em torno de 12%), pode ocorrer reação química entre o sal e a superfície da ferramenta, causando corrosão;
- Devido à fluidez do banho, há uma adsorção na superfície, e por melhor que seja a limpeza posterior, sempre sobram resíduos de sal, o que pode acarretar corrosão posteriormente, ou mesmo dificuldades para revestimentos do tipo PVD, usuais em ferramentas de corte e trabalho a frio (fig. 15)



Fig. 15: Punções para conformação de cabeça Phillips em parafusos. Tratamento NÃO pode ser em banho de sais devido à adsorção de sais na superfície de trabalho da ferramenta, o que prejudicaria seu rendimento (BRASIMET)

- Observe nas figuras 10 e 11 a movimentação das peças. Esse tipo de processo permite dispositivação muito limitada em função da necessidade de movimentação. Não é possível projetar dispositivos eficientes para prevenção de distorções dimensionais;
- A movimentação da carga torna a operação perigosa, com riscos à integridade da ferramenta (fig.12)
- A fig. 13 mostra a ferramenta sendo mergulhada no banho de resfriamento, para que se inicie a tempera. Note que a parte da baixo da ferramenta mergulha antes do restante, o que, obviamente, leva a heterogeneidades

microestruturais, tanto maiores, quanto mais longa for a ferramenta (eixos por exemplo)

- Note na fig. 14 as bordas escurecidas da ferramenta, ilustrando a heterogeneidade no resfriamento. Diferenças microestruturais importantes podem ocorrer devido a isso;
- Em moldes e ferramentas, com geometria complexa, furos, ressaltos e rebaixos são pontos de acúmulo de sal, que podem levar a severa corrosão posterior (fig. 16)

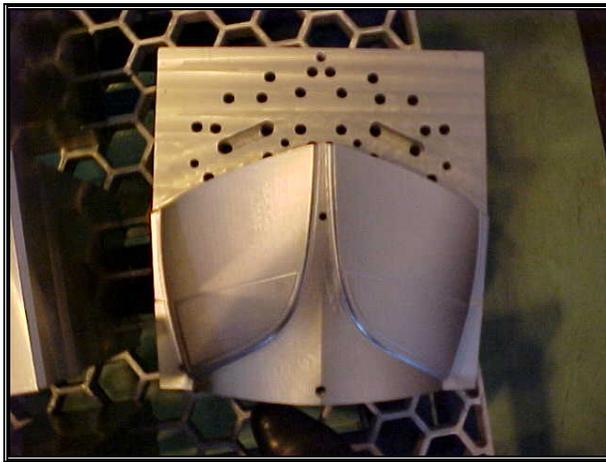


Fig.16: Ferramenta fabricada em AISI 420, aço inoxidável martensítico, apresentando grande quantidade de furos, potenciais pontos de acúmulo de sal (BRASIMET)

- Não há a menor possibilidade de um bom controle de temperatura superfície/núcleo, pois não há como instalar termopares de arraste junto à peça. Assim, os tempos de processo são, em geral “chutados”, baseado na experiência do operador;
- Como não há controle de temperatura, não há como GARANTIR que o núcleo da ferramenta atingiu a temperatura necessária, nem tampouco medir por quanto tempo ela ficou nessa dada temperatura.

Além dos problemas apontados, instalações de banhos de sais são potencialmente poluentes, principalmente no que se refere ao uso de água, envolvendo investimento intensivos em estações de tratamento de efluentes industriais.

Uma das grandes vantagens dos processos que utilizam banhos de sais fundidos é a versatilidade em comparação com processos a vácuo, p.ex. O mesmo banho pode ser utilizado em diversas temperaturas, e o aquecimento é bem mais veloz que em processos que dependem de convecção ou condução através de gases (nesse sentido, o sal é um transmissor de calor muito mais eficiente).

Apesar dessa vantagem, potencialmente interessante em termos econômicos para uma instalação comercial de tratamento térmico, as limitações severas em termos de qualidade do produto final, além das dificuldades de controle, a impossibilidade de garantir as condições de núcleo da ferramenta, e os problemas ambientais, limitam o uso de banho de sais fundidos à aços que não podem ser temperados a vácuo (como será visto a seguir).

FORNO A VÁCUO

Os modernos fornos a vácuo para tempera de ferramentas, são, de um modo geral, constituídos de uma câmara blindada, com camisa externa com circulação de água para refrigeração, e interior do forno (chamada “zona quente”) revestido com elementos isolantes de grafite (alguns fornos tem revestimento metálico, à base de molibdênio, para aplicações especiais).

O aquecimento é executado através de resistências de grafite, que tornam-se incandescentes. O vácuo é feito desde o início do processo, bombeamento através de bombas mecânicas e o nível de vácuo usual gira em torno de 10^{-2} mbar, ou 0,00001 bar (lembrando que 1,0 bar corresponde à aproximadamente 1 atm).

O oxigênio remanescente, é consumido nos elementos de grafite e revestimentos da “zona quente” e não ataca a superfície das ferramentas (basta observar que a afinidade química entre o oxigênio e o carbono é substancialmente maior que a afinidade existente entre o Fé do aço ferramenta e o oxigênio).

O resfriamento é feito através da injeção de nitrogênio sob alta pressão (de 1,0 até 10 bar nos fornos mais comuns). Assim, quando é cumprida a etapa de austenitização, a pressão reinante na câmara de trabalho varia de 0,00001 bar até 10 bar de pressão, em tempos da ordem de 12 segundos. O nitrogênio tem um coeficiente de extração de calor, tanto maior quanto maior a pressão, e, nas condições máximas, chega a valores próximos do coeficiente de extração de calor dos óleos lentos.

Existem também equipamentos que utilizam gases como Argônio ou Hélio, ou mesmo misturas de gases inertes, com funções bem específicas, como atender às necessidades da industria aeronáutica.

Esses equipamentos contam ainda com um recirculador e um trocador de calor. Assim que o nitrogênio é introduzido na câmara, extrai calor das peças, e passa através do trocador de calor (da ordem de 2200 cfm) movimentado pelo ventilador. (fig. 17)

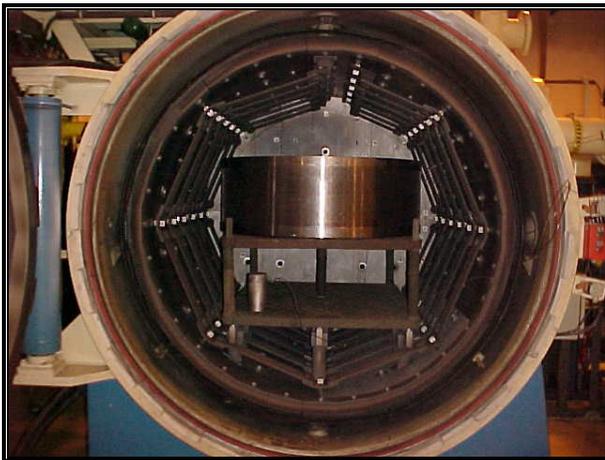


Fig.17: Interior de um forno a vácuo, com carga montada. Forno tipo IPSEN TURBO TREATER, $\phi 900 \times 1200$ mm, capacidade de carga de 1800 kg líquido. Temperatura máxima: 1300 oC
Potencia do ventilador: 350 CV
Trocador de calor: 2200 cfm
Resfriamento com N₂
(BRASIMET)

Comparando-se o processo de tratamento térmico de tempera em fornos a vácuo, com o processo convencional em banho de sais fundidos, podemos citar as seguintes diferenças:

- Não há movimentação da carga durante o processo de tempera. Todo o processo, do aquecimento ao resfriamento, é conduzido com a carga estática;

- O equipamento possibilita controle da temperatura, tanto no núcleo como na superfície da peça, o que permite GARANTIR que a ferramenta atingiu efetivamente a temperatura projetada (fig.18).

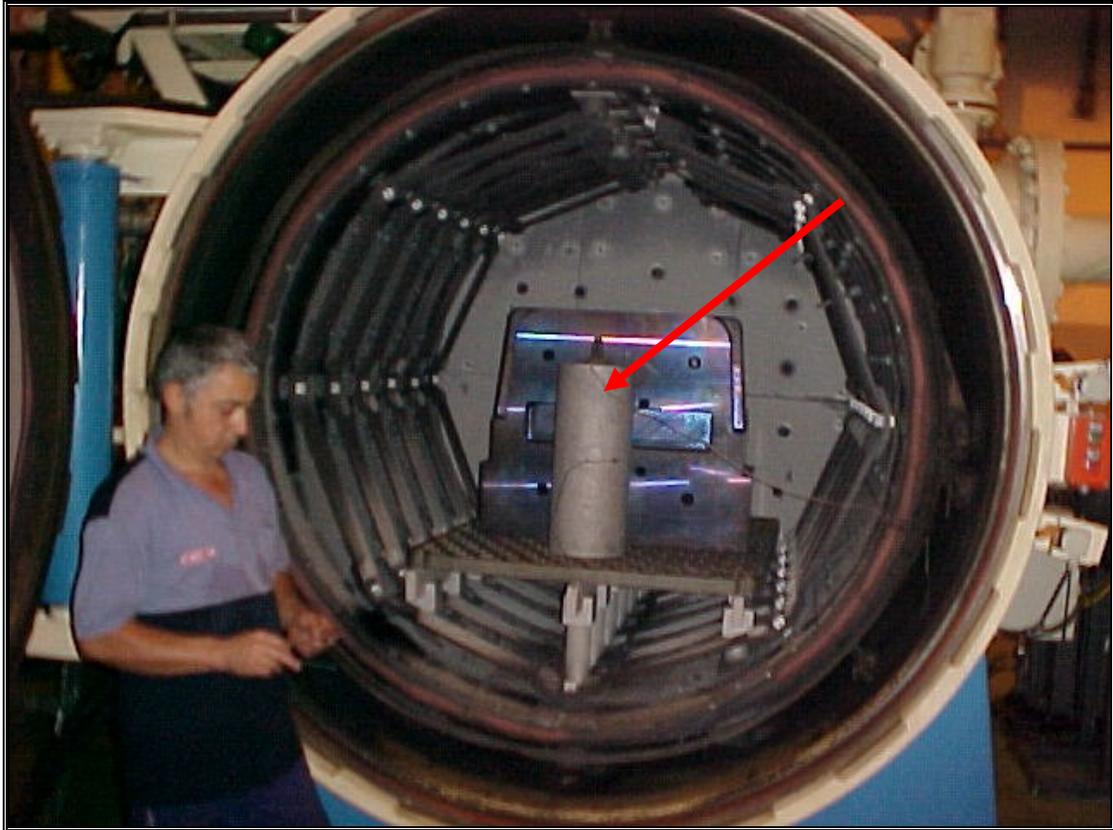


Fig.18: Carga do forno a vácuo, com ferramentas de injeção de alumínio de grande porte. Em primeiro plano, indicado pela seta vermelha, corpo de prova, onde será colocado o TERMOPAR DE ARRASTE (superfície e núcleo) (BRASIMET)

- O oxigênio é bombeado no início do processo, portanto toda etapa de aquecimento é conduzida sob vácuo, protegendo a ferramenta contra descarbonetação (fig.19)



Fig.19: Ferramenta de injeção de alumínio, fabricada em aço AISI H13, no estado TEMPERADO, em forno a vácuo (BRASIMET)

- Uma vez que o processo é integralmente conduzido sem movimentação da carga, há possibilidade de projetar dispositivos muito próximos da idealidade, visando redução de distorções dimensionais (fig.20)

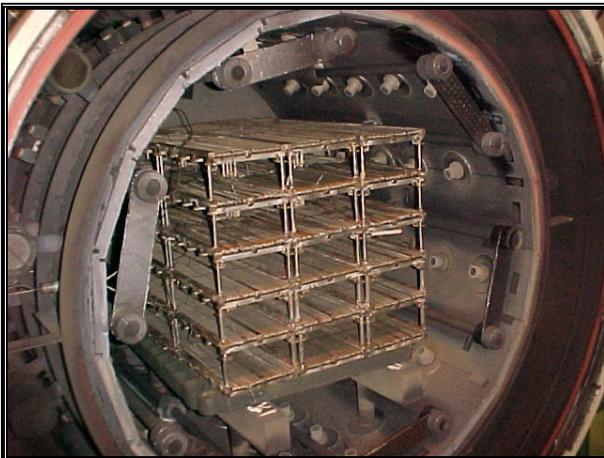


Fig.20: Carga de serras de lâminas em forno a vácuo. Montagem visa produtividade combinada com redução de distorções dimensionais (BRASIMET)

- A disposição da carga no forno também pode ser executada visando a mínima distorção dimensional possível (Fig. 21)



Fig.21: Montagem de carga em forno a vácuo, com a disposição mais adequada para reduzir distorções dimensionais (BRASIMET)

- O aquecimento é feito por elementos de resistências de grafite em toda a volta da peça (360 o), e o aquecimento, uma vez feito o vácuo, é feito através de mecanismo de irradiação (fig.22). Assim, há garantias de homogeneidade no aquecimento. Equipamentos mais modernos permitem a introdução de leve pressão positiva de gás inerte, para acelerar o processo de aquecimento (fornos convectivos).

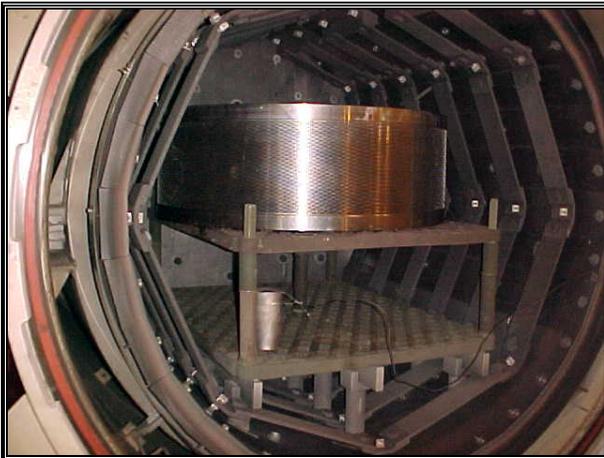


Fig.22: Vista interna do forno a vácuo, mostrando os elementos de aquecimento em grafite em toda a volta do forno (BRASIMET)

- O uso de fornos a vácuo é ECOLOGICAMENTE CORRETO, uma vez que não produz elementos poluentes. O único gás utilizado é N₂ (ou outros gases inertes como Argônio ou Hélio), inerte e não poluente (fig 23).



Fig.23: Imagem de uma instalação de vácuo. Note a limpeza e ausência de poluentes na atmosfera (BRASIMET)

- Não há ataque químico à superfície da ferramenta. Durante o processo ela fica submetida a vácuo, e no resfriamento, apenas nitrogênio toca a sua superfície. Não há risco de corrosão e tampouco oxidação (fig.24)

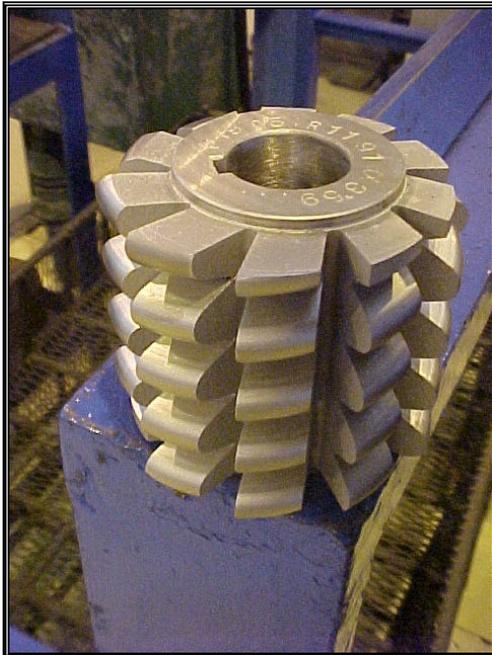


Fig.24: Ferramenta de corte fabricada em aço rápido, temperado em forno a vácuo. Completa ausência de ataque à superfície. (BRASIMET)

- Devido à ausência de manuseio, o processo a vácuo possibilita artifícios visando redução de distorções dimensionais, ou mesmo garantir maior homogeneidade microestrutural (fig.25)



Fig.25: Processo de SIMULAÇÃO DE SÓLIDO, visando redução das distorções dimensionais em ferramentas de geometria complexa (BRASIMET)

CONCLUSÃO

A tabela 2, a seguir, resume as características gerais dos equipamentos discutidos, comparando os principais requisitos necessários ao tratamento térmico de ferramentas.

REQUISITO	PROCESSO		
	FORNO CÂMARA	BANHO DE SAL	VÁCUO
Possibilidade de controlar a temperatura da superfície e do núcleo da ferramenta	Não	Não	Sim
Superfície isenta de oxidação e/ou corrosão	Ataque Severo	Ataque Severo	NENHUM ATAQUE
Risco de distorções dimensionais durante movimentação da carga durante o tratamento térmico	Alto	Alto	Inexistente
Possibilidade de dispositivação adequada	Sim	Não	Sim
Poluente	Medianamente (óleos e fumaça)	Elevado (sais)	Completamente Isento de poluentes
Homogeneidade no aquecimento e resfriamento	Não	Não	Sim
Velocidade do processo	Baixa	Alta	Mediana

APÊNDICE

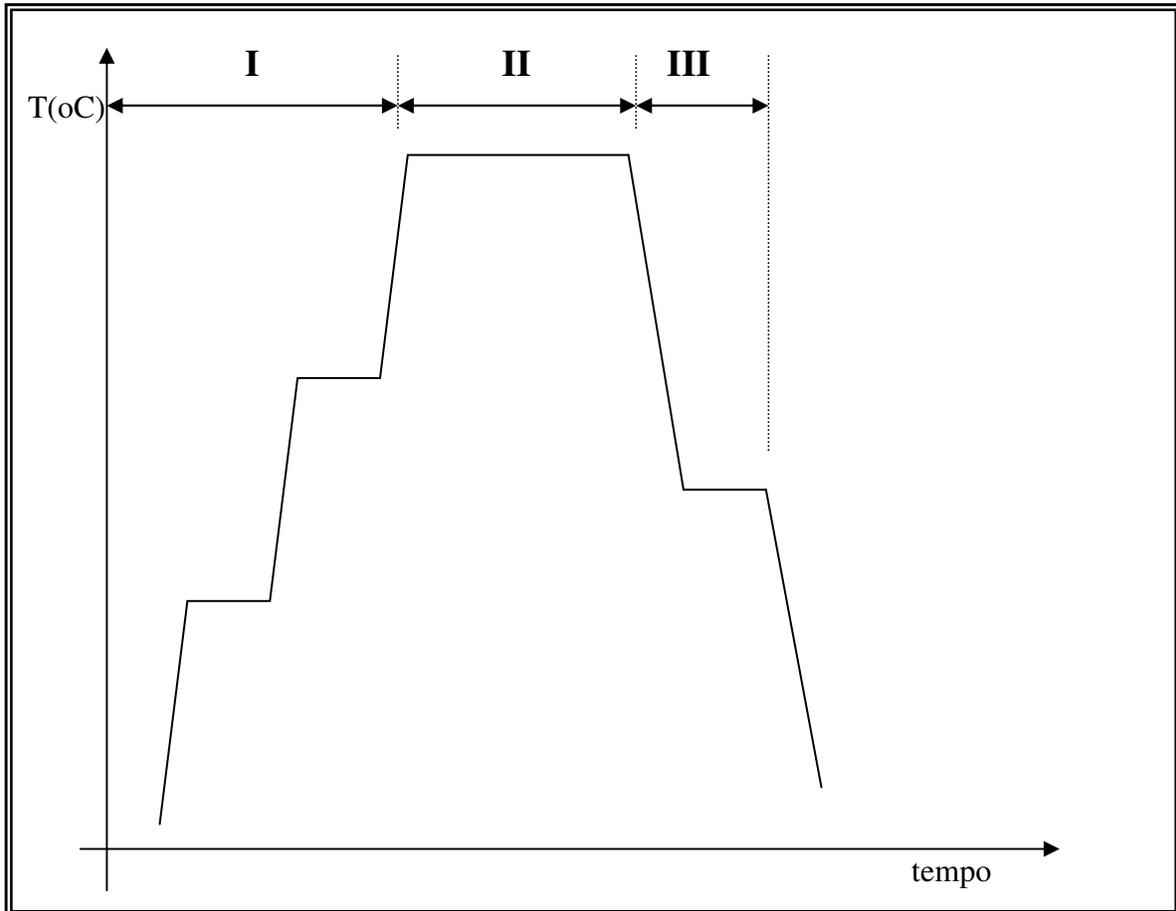
A título de ilustração, discutiremos a seguir um processo específico de tratamento térmico, recomendado por uma instituição de renome internacional, cujos detalhes impõem o uso de fornos a vácuo.

CICLO ESPECÍFICO PARA MOLDES DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO DE ALUMÍNIO

O NADCA, North American Die Casting Association, instituição de classe que congrega os fundidores de alumínio dos Estados Unidos, no seu documento #207-97, regulamenta o procedimento de tratamento térmico de tempera para MOLDES DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO DE ALUMÍNIO, conforme segue.

O documento, na sua parte II, recomenda um ciclo de tratamento térmico, que visa garantir a tenacidade do aço ferramenta, através de um processo que garanta a homogeneidade microestrutural e, adicionalmente, uma redução das distorções dimensionais, pela redução das diferenças de temperatura entre núcleo e superfície durante o resfriamento.

CICLO NADCA



TERMOPARES DE ARRASTE: a ferramenta deve ser acompanhada, diretamente nela ou em corpo de prova de geometria equivalente, por termopares de arraste, na superfície (T_s) e no núcleo (T_c). A norma 207-97 especifica maneira como esses termopares devem ser montados.

O ciclo é conduzido como segue:

ETAPA I – PRÉ AQUECIMENTO

- Taxa de aquecimento não deve exceder 200 °C/hora
- Aquecer até a faixa de 540/680 °C e manter a temperatura até que **[Ts-Tc < 90 °C]**;
- Aquecer até a faixa de 850 °C e manter até que **[Ts-Tc < 40 °C]**
- Outra etapa de pré aquecimento pode ser projetada, em função das necessidades da ferramenta.

ETAPA II – AUSTENITIZAÇÃO

- Aquecimento rápido, de 850 a 1030 °C
- Manter à 1030 °C (controlador do forno) durante 30 minutos após **[Ts-Tc < 15 °C]** ou no máximo 90 minutos após **Ts=1030 °C**, o que ocorrer primeiro.

ETAPA III – RESFRIAMENTO

- Resfriar o mais rapidamente possível até Ts=450 °C;
- A velocidade de resfriamento deve ser de 28 °C/minuto, entre 1030 e 540 °C (medido por Ts);
- Interrupção do resfriamento (necessário quando, no resfriamento, **[Tc-Ts > 90 °C]** quando **[400°C < Ts < 450 °C]**;
- Manter a interrupção enquanto **[Tc-Ts < 90 °C]** observando um máximo de 30 minutos após a interrupção do resfriamento;
- Continuar o resfriamento até que Ts < 150 °C. A ferramenta deve esfriar até no mínimo 65 °C no núcleo, antes de iniciar o ciclo de revenido.

COMENTÁRIOS

Fica óbvio, pela descrição do processo, que não é possível conduzir este ciclo em outro equipamento que não fornos a vácuo, principalmente devido à necessidade de interromper o resfriamento nas temperaturas indicadas.

Em termos práticos, é impossível tal configuração em equipamentos do tipo banho de sais fundidos, e em fornos câmara, as dificuldades de controle e montagem de termopares de arraste inviabilizam a aplicação.

CONCLUSÃO

Na moderna indústria de ferramentas, a etapa de tratamento térmico ocupa, cada dia mais, em função dos cada vez mais severos requisitos de qualidade de produção, uma posição de destaque, tanto pelo potencial de melhorias, como pelo de causar danos e prejuízos muitas vezes irremediáveis.

No sentido de aproveitar as melhores tecnologias, buscando sempre a melhor condição possível para as ferramentas, a escolha do processo e, conseqüentemente do equipamento de tratamento térmico assume fundamental importância.

Dentro dos muitos processos, aqueles que utilizam de tecnologia de vácuo, firmam-se como a melhor opção possível, sempre que se refere a aços ferramenta para moldes, matrizes e ferramentas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NADCA Recommended Procedures, #207-97, NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, USA, 1997
2. METALS HANDBOOK, Vol. 3, 9a. ed., ASM