

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA REALIZADO EM FORNO A VÁCUO E BANHO DE SAL, APLICADO AOS AÇOS FERRAMENTA ¹

*Piter Alves Sousa²
Carlos Henrique da Silva³*

Resumo

A realização de um tratamento térmico objetiva, através de ciclos de aquecimento e resfriamento controlados, em uma atmosfera adequada, possibilitar transformações microestruturais que resultem em propriedades mecânicas necessárias à aplicação de uma ferramenta. Para os aços ferramenta, o tratamento térmico de têmpera é consideravelmente crítico, onde variações mínimas dos parâmetros de processo resultam em microestruturas diferentes e, conseqüentemente, em desempenhos insatisfatórios. Este artigo realiza uma análise entre o tratamento térmico de têmpera em aços ferramenta, realizado a vácuo e em banho de sal, avaliando as condições de tratamento e influência nas propriedades finais do material. A tecnologia do tratamento a vácuo possibilita controle rigoroso dos parâmetros de processo, garantindo integridade superficial, menor distorção comparado com tratamentos realizados em banho de sal e homogeneidade microestrutural, através do controle do gradiente de temperatura entre superfície e núcleo, com taxas de resfriamento adequadas. Por estas razões, considera-se a escolha do tratamento térmico de têmpera a vácuo como a melhor opção para os aços ferramenta, onde, embora o custo maior, os controles no processo são extremamente superiores ao tratamento em banho de sal, e o resfriamento com nitrogênio sob pressão garante total transformação da microestrutura, impedindo a precipitação de carbonetos em contorno de grão.

Palavras-chave: Forno a vácuo; Banho de sal; Aços ferramenta.

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THE HARDENING HEAT TREATMENT IN VACUUM FURNACES AND SALT BATH, APPLIED TO TOOL STEEL

Abstract

The objective of heat treatment is, through controlled cycles of heating and cooling, in a suitable atmosphere, enable modifications in the microstructure and resulting in mechanical properties essential to tooling applications. For tool steels, the hardening is critical and the variations of the treatment parameters result in different microstructures and unsatisfactory performance. This article analyzes the hardening heat treatment of tool steels, realized in vacuum furnace and salt bath, evaluating the treatment conditions and the influence in the final properties. The technology in vacuum furnaces enables a rigorous control of the process, conferring surface integrity, less distortion when compared with the salt bath treatment and microstructural homogeneity, through the control of temperature between surface and core, with adequate cooling rates. However the cost is higher, for these reasons, the hardening in vacuum furnaces is the best choice for tool steels because the controls are extremely superior compared to the salt bath heat treatment and the cooling using nitrogen warrants a total transformation of the microstructure, preventing the carbides precipitation in grain boundary.

Key words: Vacuum furnace; Salt bath; Tool steel.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Tecnólogo em Processos Metalúrgicos, Bodycote Brasimet Processamento Térmico S/A.*

³ *Engenheiro Metalúrgico, Bodycote Brasimet Processamento Térmico S/A.*

1 INTRODUÇÃO

Os aços ferramenta foram desenvolvidos para o processamento de outros materiais onde, entre as características básicas necessárias para suas aplicações, está a capacidade de suportar condições severas de trabalho,⁽¹⁻⁵⁾ que podem envolver mecanismos de desgaste, ataques químicos ou esforços mecânicos. O tratamento térmico desta classe de aços deve apresentar algumas precauções, em função da grande quantidade de elementos de liga, onde variações mínimas nos parâmetros de processo resultam em microestruturas diferentes e conseqüentemente em desempenhos insatisfatórios da ferramenta.^(2-4,6) Entre os problemas relacionados ao tratamento térmico de têmpera dos aços ferramenta estão, o crescimento de grão, em função de tempos e/ou temperaturas inadequadas de austenitização e a precipitação de carbonetos em contorno de grão, com transformação parcial da microestrutura, resultantes de taxas de resfriamento insuficientes.⁽²⁻⁷⁾

Como opção para têmpera dos aços ferramenta pode-se relacionar dois processos, o tratamento em banho de sal e o realizado em forno a vácuo. A têmpera em banho de sal consiste na imersão da peça no sal fundido, o qual é responsável pelo aquecimento e proteção da superfície contra oxidação e descarbonetação. O meio de resfriamento adotado depende da composição química do aço, podendo ser realizado em óleo, sal fundido ou ar.⁽²⁻⁷⁾

As variações do tratamento térmico realizado em banho de sal estão relacionadas à necessidade de movimentação constante da peça em tratamento, uma vez que os banhos de sais têm temperaturas fixas, o que pode dar abertura para problemas de oxidação, descarbonetação e deformação durante as etapas de transferência.⁽⁷⁾ A aplicação de revestimento PVD após a têmpera em sal também pode ser afetada, caso a limpeza não seja realizada de forma cuidadosa, fazendo com que a aderência do revestimento não seja eficiente, ocasionando deslocamentos e conseqüentemente redução do rendimento da ferramenta.⁽⁷⁾

O processo a vácuo é realizado em uma câmara isenta de oxigênio, evacuada com o auxílio de bombas de alto vácuo.^(2,6-9) A atmosfera resultante previne a ferramenta contra reações na superfície, como descarbonetação e oxidação, removendo também impurezas como filmes de óxidos e resíduos de lubrificantes provenientes da etapa de fabricação da ferramenta.^(2,6) O aquecimento é proporcionado por irradiação, através das resistências de grafite, dispostas no equipamento de forma que a temperatura seja uniforme em toda a câmara.^(2,6-9) O grafite auxilia ainda na eliminação do oxigênio residual, que tem maior tendência a combinar com o carbono do que com o ferro existente na composição química do aço.^(3,10) Além disso, a possibilidade de montagem de cargas em dispositivos e o fato de não haver movimentação das ferramentas durante o tratamento, uma vez que as etapas de pré-aquecimento, austenitização e resfriamento ocorrem dentro da câmara, minimizam as distorções dimensionais.⁽⁷⁾

O resfriamento para que ocorram as transformações microestruturais necessárias à aplicação da ferramenta, no forno a vácuo, é realizado através da injeção de nitrogênio sob pressão, medida em bar.^(2,6) A pressão de resfriamento deve ser adequada em função da espessura da ferramenta, garantindo taxas de resfriamento mínimas para evitar a presença de perlita, bainita ou precipitação de carbonetos em contorno de grão.^(2,6,10)

O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise comparativa entre o tratamento térmico de têmpera realizado em banho de sal e em forno a vácuo,

aplicados aos aços ferramenta, avaliando a influência dos dois processos sobre as características finais da peça em tratamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste estudo foi avaliada a influência do processo de têmpera realizado em banho de sal e em forno a vácuo, sobre três características dos aços ferramenta: integridade superficial, deformação e homogeneidade microestrutural.

A avaliação da integridade da superfície foi realizada através da análise de dois corpos de prova retificados com dimensões de 80mmx80mmx80mm, confeccionados em aço AISI H13, submetidos à têmpera pelos dois processos. Os ciclos empregados seguem apresentados nas Figuras 1 e 2, sendo os parâmetros de temperatura de pré-aquecimento e austenitização semelhantes, alterando-se apenas o tempo de permanência e o meio de resfriamento. A necessidade de tempos maiores no processo realizado em banho de sal ocorre em função da falta de controle de temperatura entre superfície e núcleo, que é monitorado no forno a vácuo através de um termopar alocado em corpo de prova.

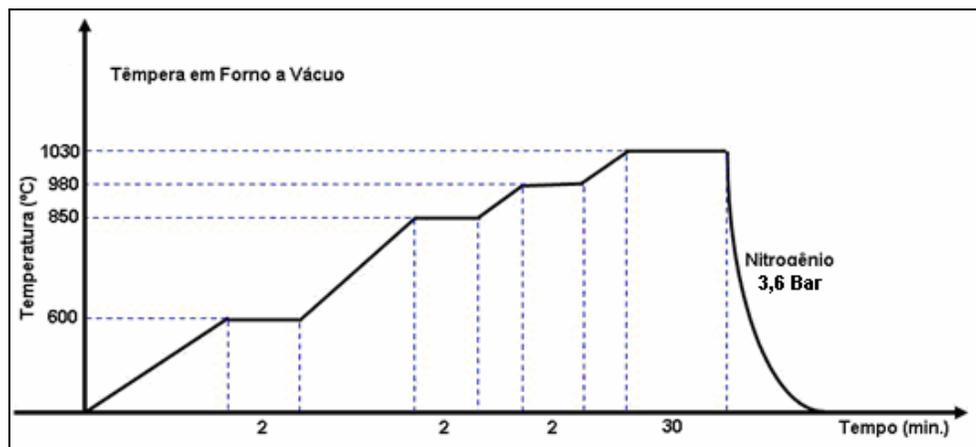


Figura 1. Ciclo adotado no tratamento realizado em forno a vácuo (AISI H13).

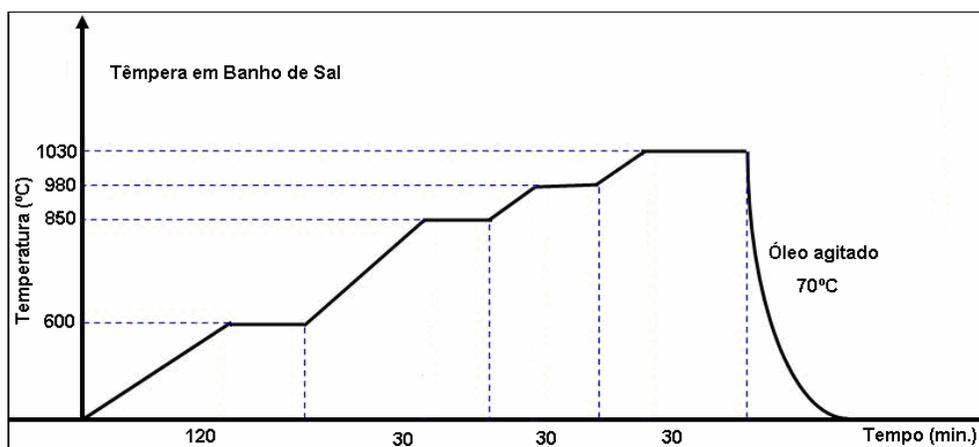


Figura 2. Ciclo adotado no tratamento realizado em banho de sal (AISI H13).

Além da análise visual da superfície, para verificar a formação de filmes de óxido e corrosão, foram realizados ensaios de microdureza e análises

metalográficas para avaliar a influência dos dois processos na integridade superficial dos corpos de prova, na prevenção do fenômeno de decarbonetação.

Para o estudo de deformação originada pelos dois processos, utilizaram-se corpos de prova em aço AISI M2, em barras, com 22 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, realizando avaliações posteriores aos processos de têmpera, executados segundo os ciclos apresentados nas Figuras 3 e 4. A análise foi realizada com o auxílio de um relógio comparador Digimes, sendo as barras presas entre pontas para avaliação do empenamento após a têmpera.

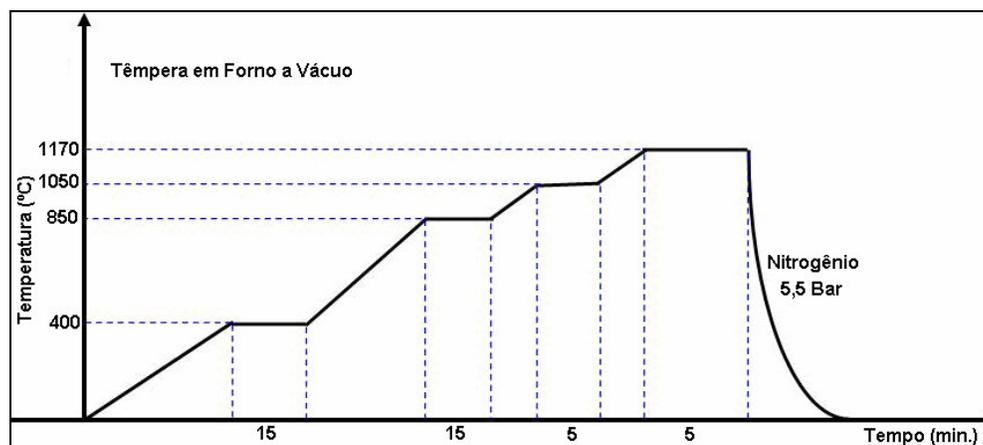


Figura 3. Ciclo adotado no tratamento realizado em forno a vácuo (AISI M2).

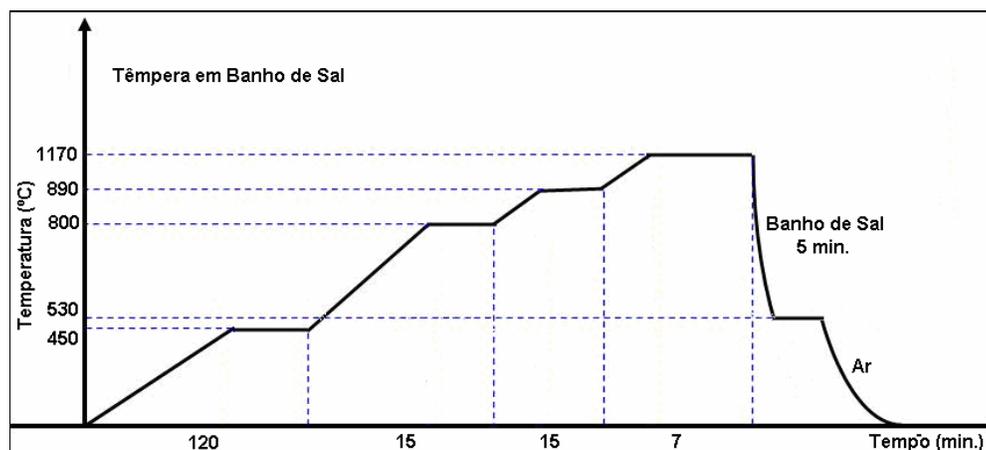


Figura 4. Ciclo adotado no tratamento realizado em banho de sal (AISI M2).

A homogeneidade microestrutural proporcionada pelos processos realizados a vácuo e em banho de sal foi avaliada através de análises metalográficas e determinação do perfil de dureza das duas amostras do aço AISI H13, utilizadas para análise da integridade da superfície. As análises metalográficas foram realizadas para identificar possíveis transformações bainíticas, ou regiões perlíticas, produtos de uma má transformação em função de uma taxa de resfriamento insuficiente.

Para realização das análises metalográficas e ensaios de dureza foram utilizados um microscópio Union - Versamet e um micro durômetro Pantec HXD 1000 TM, respectivamente. Os tratamentos em forno a vácuo foram realizados em um equipamento com pressão de resfriamento máxima de 6 bar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Integridade da Superfície

O controle da atmosfera de tratamento é importante na têmpera de aços ferramenta. Problemas relacionados à descarbonetação, carbonetação e oxidação da superfície de uma ferramenta resultam em queda de rendimento por falhas ou, em processos posteriores de revestimento PVD, resíduos na superfície resultam em problemas de aderência da camada depositada.⁽⁷⁾ As Figuras 5 e 6 apresentam as características superficiais das amostras tratadas em banho de sal e forno a vácuo, respectivamente, onde nota-se que, o acabamento superficial do tratamento com atmosfera isenta de ar (oxigênio), praticamente não interfere na condição superficial da ferramenta. A amostra tratada em banho de sal apresentou corrosão superficial pela ação do sal empregado no banho de austenitização.



Figura 5. Condição superficial após tratamento térmico em banho de sal.



Figura 6. Condição superficial após tratamento térmico em forno a vácuo.

As análises microestruturais seguem apresentadas na Figura 7, onde nota-se que houve empobrecimento superficial na amostra tratada em banho de sal, sendo os valores de dureza superficial inferiores à tratada em vácuo. A descarbonetação pode ser relacionada à ação da atmosfera externa ao banho de austenitização, durante a transferência da amostra para o meio de resfriamento em óleo. A figura 8 apresenta a curva dos perfis de dureza das amostras, identificando que a amostra tratada em banho de sal apresenta dureza inferior à encontrada no núcleo a uma profundidade de aproximadamente 10 μm .

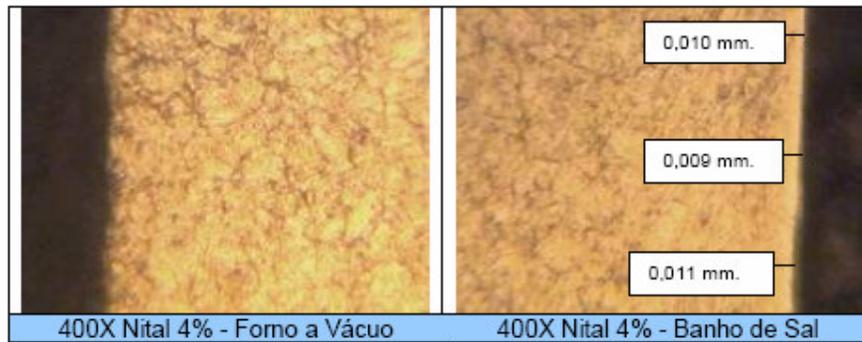


Figura 7. Análise metalográfica da superfície das amostras.

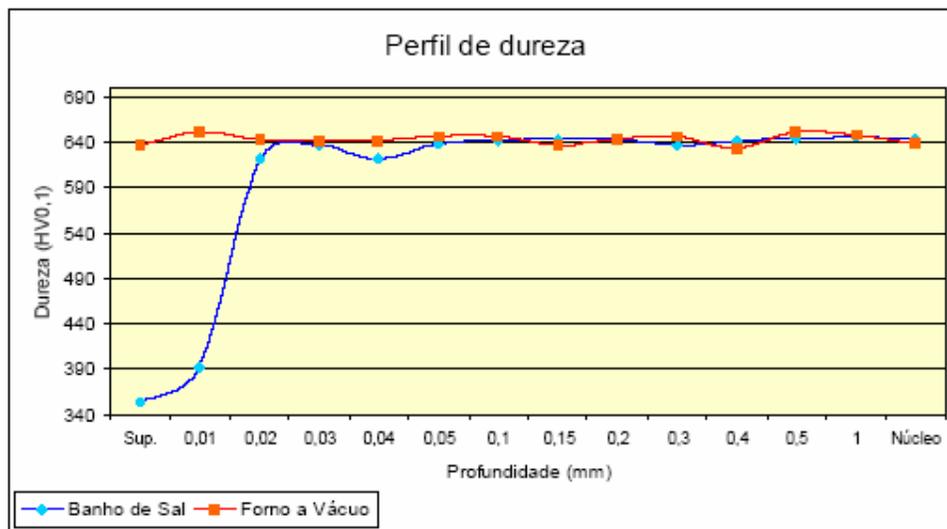


Figura 8. Perfis de dureza das amostras tratadas em vácuo e banho de sal.

O controle desta zona empobrecida é extremamente importante onde, embora exista a consideração de sobre metal, caso a região afetada seja superior à espessura deixada, o empobrecimento restante resultará em queda do rendimento da ferramenta.

No processo realizado a vácuo não foram encontrados problemas relacionados à integridade superficial, uma vez que a atmosfera na câmara de tratamento impossibilita qualquer reação com a ferramenta.^(2,6-9) Além disso, o oxigênio residual reage com as resistências de grafite, por ser mais reativo com o carbono do que com o ferro existente na composição química do material.^(2,6)

A realização de tratamentos criogênicos em peças que apresentem empobrecimento superficial certamente gerará trincas, sendo assim a têmpera em banho de sal é um limitante para o tratamento criogênico de aços ferramenta.

3.2 Distorções

Para o tratamento térmico de têmpera, existe a prática comum da consideração de sobre metal, para compensar as deformações ocorridas durante o processo. Entretanto, estas deformações podem ser divididas em dois grupos: as inevitáveis e as evitáveis. Entre as deformações inevitáveis estão as ocorridas em função das alterações microestruturais e as ocasionadas pela dilatação e contração da peça, durante as etapas de aquecimento e resfriamento, respectivamente.⁽²⁻⁶⁾

A transformação de martensítica é provocada por processos de cisalhamento que resultam em estruturas tetragonais altamente distorcidas devido à supersaturação de carbono. A martensita, altamente distorcida e supersaturada, provoca considerável aumento de volume no componente ou ferramenta tratada.⁽²⁻⁵⁾ A Figura 9 apresenta o comportamento de uma ferramenta quando exposta às variações de temperatura no processo de têmpera. Em conjunto com as transformações da microestrutura, a diferença no comportamento entre superfície e núcleo resulta em estados de tensões diferentes, o que também causam deformações na ferramenta.

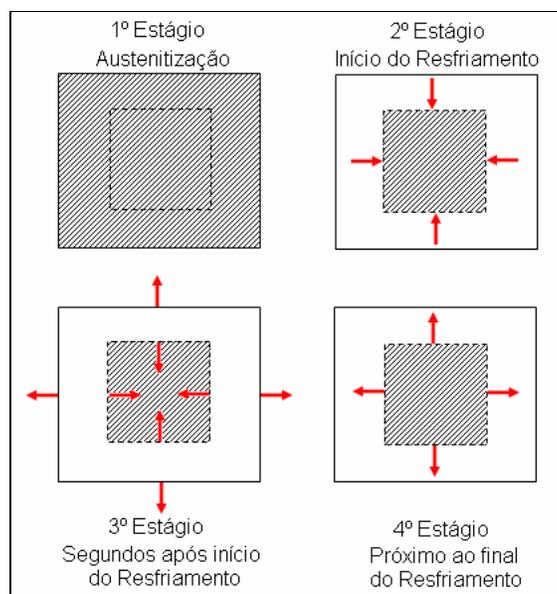


Figura 9. Estados de tensões de uma ferramenta durante a têmpera.⁹⁵⁾

No processo de austenitização, a temperatura está homogênea e a expansão ocorre uniformemente. Com o início do resfriamento, a superfície tende a perder temperatura mais rápido do que o núcleo, gerando um gradiente de temperatura que torna a contração superficial maior do que a do núcleo. No terceiro estágio, a superfície da ferramenta começa a transformação da microestrutura com o núcleo ainda se contraindo, sendo que no quarto estágio, a superfície já se apresenta transformada, enquanto o núcleo inicia a transformação.⁽⁵⁾

Entre as deformações evitáveis, estão as relacionadas a problemas de montagem de carga e movimentação desta durante o tratamento térmico.⁽⁷⁾ O ciclo genérico realizado na têmpera de um aço ferramenta segue apresentado na figura 10. Observa-se que, o tratamento é iniciado com etapas de pré-aquecimento, elevação da temperatura acima da zona crítica, promovendo a austenitização do material, manutenção nesta temperatura para homogeneização entre superfície e núcleo, seguido de resfriamento com um taxa de extração de calor suficiente para promover a transformação martensítica.

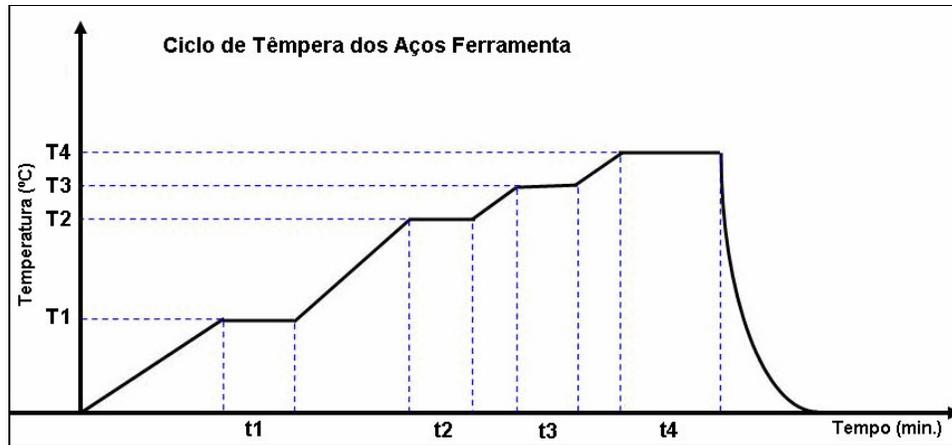


Figura 10. Ciclo genérico do processo de têmpera dos aços ferramenta.

As etapas de pré-aquecimento objetivam o aumento uniforme de temperatura em toda a massa da peça, para evitar diferenças entre superfície e núcleo. No processo a vácuo, os patamares de pré-aquecimento são determinados a partir de um termopar inserido na peça ou no núcleo de um corpo de prova, o qual simula a espessura da peça em tratamento.⁽⁷⁾ A Figura 11 apresenta uma matriz em AISI H13, com o corpo de prova simulando a sua massa.



Figura 11. Matriz acompanhada do corpo de prova para controle de temperatura.

Como a carga fica estática em um ambiente sem ar (oxigênio), não há condições que favoreçam deformações durante o processo e afetem a qualidade superficial da ferramenta. No processo realizado em banho de sal, entretanto, há a necessidade de movimentação da carga para realização do pré-aquecimento, uma vez que o banho para austenitização não permite variações de temperatura, sendo necessários banhos intermediários para o pré-aquecimento. A tabela 1 apresenta o ciclo de tratamento térmico de amostras do aço M2 tratadas em banho de sal e forno a vácuo, onde se avaliou o empenamento resultante para os dois processos. Nota-se que, para o tratamento em banho de sal, os valores de empenamento são consideravelmente maiores quando comparados ao tratamento em forno a vácuo.

Tabela 1. Empenamento em função do processo de têmpera.

Corpo de Prova	T°C Pré-aquecimento e Austenização	Empenamento anterior ao Processo	Empenamento Posterior ao Processo
Amostra Banho de Sal	600 850	0,02 mm.	0,08 mm.
Amostra Forno a Vácuo	1050 1180	0,02 mm.	0,03 mm.

A necessidade de movimentação da carga para o pré-aquecimento e austenitização em banho de sal, essencialmente nas duas últimas temperaturas de tratamento, são consideradas críticas, pois nesta faixa de temperatura, os aços ferramenta estão suscetíveis à deformação em função da sua própria massa. A Figura 12 apresenta uma análise da movimentação de carga na realização da têmpera em um aço AISI H13, tratado em banho de sal.



Fonte: Yoshida.

Figura 12. Transição da carga entre a última etapa de pré-aquecimento (1) e austenitização (3).

Nota-se que, quanto maior for a ferramenta, mais crítica é a sua movimentação e, conseqüentemente, maior a deformação. Por este motivo, considera-se extremamente importante uma distribuição adequada dos fornos de banho de sal, para minimização dos problemas relacionados às distorções.

3.3 HOMOGENEIDADE MICROESTRUTURAL

As transformações microestruturais ocorrem em função do choque térmico, ocasionado pelo resfriamento da ferramenta a taxas suficientes para evitar a presença de perlita e transformações bainíticas. Sendo assim, considera-se a total transformação da microestrutura uma relação entre a homogeneidade da temperatura de austenitização entre superfície e núcleo, a taxa de resfriamento na têmpera e a espessura da ferramenta em tratamento ^(2, 6). A taxa de resfriamento é relacionada, no processo em banho de sal, pelo meio empregado e no forno a vácuo, pela pressão de nitrogênio adotada.

No processo realizado em banho de sal, peças com grandes espessuras apresentam variações nas transformações microestruturais. A figura 13 apresenta uma ferramenta em aço AISI H13, durante a etapa de têmpera, onde a imersão da peça no óleo gera uma diferença de temperatura entre a primeira e a última região resfriada, acentuada ainda pelo aquecimento do óleo, o que resulta na redução da taxa de extração de calor. Além disso, existe uma diferença de temperatura entre superfície e núcleo, que pode ser constatada pela mudança de coloração entre as bordas da ferramenta e a seção de maior massa, a qual apresenta temperatura elevada enquanto as regiões superficiais já estão transformadas.



Figura 13. Processo de têmpera em óleo agitado e aquecido a 70°C.^{9/)}

No processo realizado em forno a vácuo, a pressão de nitrogênio utilizada no resfriamento, o trocador de calor do forno e o tamanho da peça são responsáveis pela transformação total da microestrutura da ferramenta, partindo-se do pressuposto de que o tempo e temperatura de austenitização estão adequados ao material e espessura da ferramenta em tratamento. A Figura 14 apresenta o sistema de resfriamento realizado em forno a vácuo, onde os bicos injetores de nitrogênio são dispostos na câmara de tratamento de forma que o resfriamento seja homogêneo. Porém, caso a pressão de resfriamento não seja suficiente para promover taxas adequadas à transformação martensítica, regiões perlíticas e bainíticas também podem ocorrer. A faixa ideal de pressão de trabalho é entre 2,5 e 5,0 bar, principalmente entre 1.000°C e 540°C, onde pressões inferiores resultam nos problemas relacionados à transformação parcial da microestrutura, com precipitação de carbonetos em contorno de grão e, pressões mais altas, em riscos de empenamento excessivo e trincas.

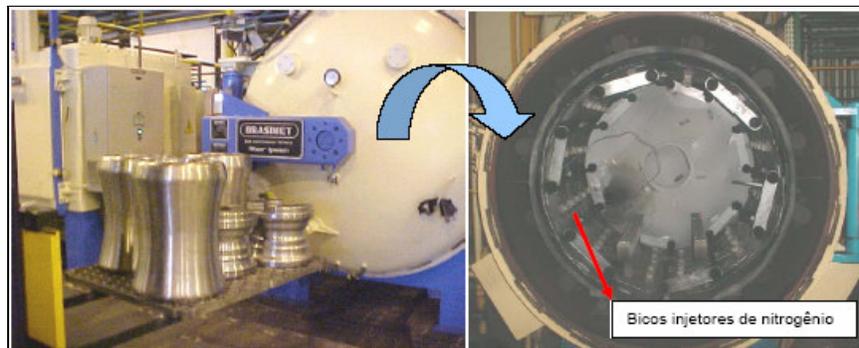


Figura 14. Sistema de resfriamento em forno a vácuo.

O tempo de austenitização no forno a vácuo é controlado pela monitoração da temperatura da superfície e do termopar alocado no núcleo da peça/corpo de prova. No processo realizado em banho de sal este tempo é empírico e controlado apenas com o auxílio de um cronômetro, o que pode gerar desvios.

A Figura 15 apresenta as análises metalográficas realizadas nas amostras do aço AISI H13, na região do núcleo, para verificar a transformação em função dos processos desenvolvidos. A amostra tratada em banho de sal apresentou a microestrutura mais grosseira, com grãos maiores, quando comparada com a amostra tratada em vácuo. Esta diferença de granulometria tem relação direta com o tempo em temperatura de austenitização, que no forno a vácuo é controlada através da alocação de um termopar no núcleo do corpo de prova e, em banho de sal,

controlada com o auxílio de um cronômetro, pelo operador do equipamento. Não foram identificadas zonas perlíticas ou regiões com transformações bainíticas.

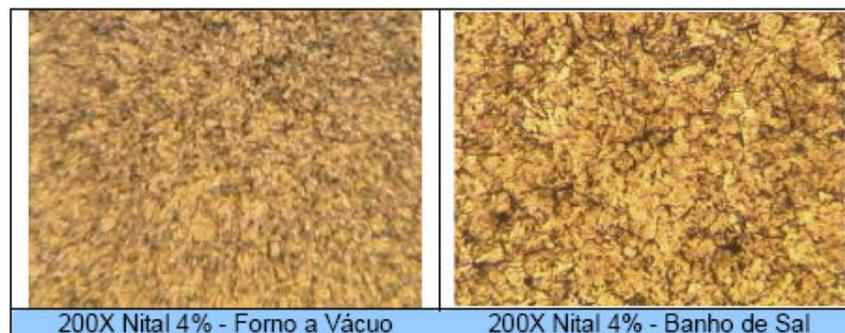


Figura 15. Análise metalográfica do núcleo das amostras.

Segundo a norma NADCA#06, o resfriamento entre 980°C e 550°C, para o aço AISI H13, deve apresentar uma taxa de resfriamento mínima de 28°C/min, monitorado por termopares alocados na superfície e no núcleo da amostra.⁽⁹⁻¹¹⁾

O resfriamento realizado no forno a vácuo empregou pressão de 3,6 bar, com o ciclo de têmpera direta. As taxas de resfriamento da superfície e do núcleo das amostras foram de 35°C/min. e 40°C/min., respectivamente.

4 CONCLUSÕES

O tratamento térmico de têmpera em aços ferramenta apresenta particularidades que tornam crítica à execução do processo, onde variações mínimas dos parâmetros de tratamento podem resultar em microestruturas diferentes e em rendimento insatisfatório da ferramenta.

A têmpera executada em forno a vácuo permite um controle da integridade superficial, uma vez que o processo é realizado sem presença de ar (oxigênio), que inibe qualquer reação de descarbonetação ou formação de óxidos. Além disso, a montagem de carga e o tratamento realizado sem movimentação das ferramentas minimizam distorções, as quais são superiores no processo em banho de sal em função da necessidade de movimentação da carga para as etapas de pré-aquecimento, austenitização e resfriamento. A pressão de resfriamento do forno a vácuo, com 3,6 bar, foi eficiente para promover total transformação da microestrutura, evitando regiões perlíticas, bainíticas e precipitação de carbonetos em contorno de grão, prejudiciais à microestrutura do material, resultando em baixo rendimento em aplicação.

O tratamento térmico de têmpera em banho de sal apresenta problemas de controle durante o processo, por não haver condições de avaliação do gradiente de temperatura entre superfície e núcleo, que em fornos a vácuo é realizado através de termopares alocados em corpos de prova, os quais simulam a espessura média da carga em tratamento.

Sendo assim, conclui-se que a tecnologia envolvida no tratamento térmico em forno a vácuo possibilita um controle rigoroso dos parâmetros de processo, garantindo a integridade superficial, menor distorção quando comparado com tratamentos realizados em banho de sal e homogeneidade microestrutural, através do controle do gradiente de temperatura entre superfície e núcleo, com taxas de resfriamento adequadas.

O processo executado em banho de sal é instável, dependente de um rigoroso controle de todas as etapas, que não são automatizadas. O controle dos parâmetros de processo é realizado por operadores, havendo limitações no controle de tempo de austenitização e velocidade de transporte até o meio de resfriamento (têmpera), não sendo aconselhável a prática deste tratamento térmico para ferramentas com exigência de alta performance e produtividade.

REFERÊNCIAS

- 1 AMERICAN SOCIETY FOR METALS: Heat treater's guide: Standard practices and procedures for steel, 1982.
- 2 ASM Handbook: Volume 4 – Heat Treating. ASM International, 1991.
- 3 KRAUSS, G.: Steels – Heat treating and processing principles. ASM International.
- 4 ROBERTS, G. A.; HAMAKER, J. C.; JOHNSON, A.R.: Tool Steels. 3 ed. ASM International, 1962.
- 5 SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto: Aços e ligas especiais. Edgard Blücher, 2006.
- 6 TOTTEN, George E.; HOWES, Maurice A. H.: Steel heat treating handbook. Marcel Dekker, 1997.
- 7 YOSHIDA, S.: Comparativo de processos de tratamento térmicos de moldes e ferramentas. Brasimet Comércio e Indústria S/A, 2004.
- 8 EPRI Center for Materials Fabrication: Vacuum furnaces for heat treating, brazing and sintering. E.U.A, 1999.
- 9 KOWALEWSKI, J.; OLEJNIC, J.: Importance of precision cooling during vacuum heat treating of hot work tool steel. Seco/Warwick, 2005.
- 10 APPLETON, J.: The importance of quench rates on the toughness of hot work steels for die-casting. TTI Group.
- 11 Standard specification die insert material and heat treating specification. Spec. NO. DC-9999-1, Revision 18, 2005.