

Tratamentos criogênicos nos metais

Weimar Silva Castilho⁽¹⁾

Data de submissão: 15/4/2019. Data de aprovação: 25/6/2019.

Resumo – Os tratamentos térmicos criogênicos nos metais são utilizados sobretudo para aumentar a resistência ao desgaste e a tenacidade. É fato que ferramentas tais como brocas e fresas helicoidais, que trabalham em altas velocidades e sob altas temperaturas, necessitam de alta dureza e resistência, sem intercorrência em condições extremas de operação. A inserção da etapa de alívio de tensões antes desses tratamentos é uma prática corriqueira nas indústrias, com a finalidade de evitar trincas devido aos gradientes térmicos durante o processo de resfriamento do metal. A obtenção de tais propriedades mecânicas é feita através dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido. Entretanto, trabalhos anteriores indicaram que essa prática está diretamente relacionada a um efeito estabilizador da austenita retida. O presente trabalho é uma revisão da literatura que teve objetivo de apresentar as alterações na microestrutura dos metais após tratamento criogênico.

Palavras-chave: Alívio de tensões. Metais. Tratamento criogênico.

Cryogenic treatment in metals

Abstract – Cryogenic heat treatments in metals are mainly used to increase, wear resistance and toughness. It is imperative that such tools as drills and helical mills, which work at high speeds and at high temperatures, when in service to both need high hardness and resistant, without intercurrent in extreme conditions of operation. The insertion of the stress relief step before these treatments is a common practice in industries, in order to avoid cracking due to thermal gradients during the metal cooling process. The obtaining of such mechanical properties is done through the tempering and tempering heat treatments. However, previous work has indicated that this practice is directly related to a stabilizing effect of the retained austenite. The present work is a review of the literature that had the objective to present the changes in the microstructure of the metals after cryogenic treatment.

Keywords: Stress relief. Metals. Cryogenic treatment.

Introdução

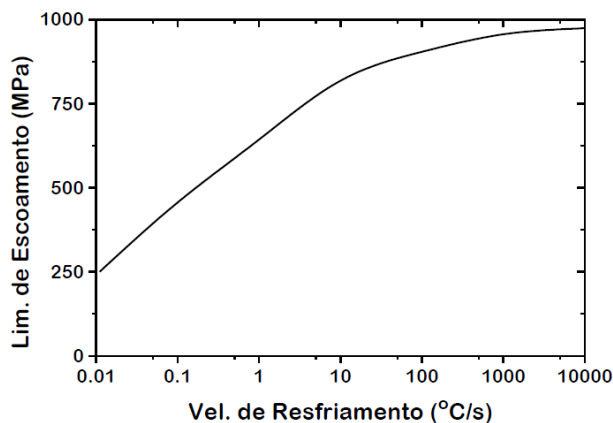
Uma necessidade atual nas indústrias metalúrgicas é a elevação da produtividade para aumentar a competitividade. Neste contexto é imprescindível que as ferramentas de corte durem mais e mantenham a qualidade de acabamento do componente usinado. Muitas vezes para elevar a produtividade é necessário aumentar as velocidades de corte, o que torna o processo de usinagem mais rápido. O inconveniente é o aumento das temperaturas devido ao atrito e ao calor gerado na interface peça-ferramenta; consequentemente, o calor pode ser prejudicial aos resultados do processo, reduzindo a dureza da ferramenta e aumentando o seu desgaste. Em alguns casos, a literatura (VALES, 2010; SARTORI, 2009; HUANG *et al.*, 2003; LAKHTIN, 1975) nos apresenta que a utilização de fluido convencional não é eficiente na redução da temperatura da ferramenta de corte em processos de alta produtividade.

Os tratamentos térmicos aplicados aos metais, em sua maioria, visam controlar e aperfeiçoar suas propriedades, pois as propriedades dos sólidos estão diretamente relacionadas com a estrutura resultante dos tratamentos térmicos ou mecânicos sofridos anteriormente (LAKHTIN, 1975). Para ilustrar esse efeito, a Figura 1 apresenta um gráfico de um aço com

¹ Professor doutor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico do *Campus* Palmas, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Tocantins – IFTO, e professor do mestrado Profissional em Educação Profissional e Tecnológica (ProfEPT). *weimar@ifto.edu.br

0,8% de carbono, após aquecimento a 900 °C, durante uma hora. Neste caso, as condições de resfriamento causaram uma variação de 300% na resistência à deformação plástica do metal (MODENESI *et al.*, 2012).

Figura 1 – Variação do limite de escoamento com a velocidade de resfriamento para um aço SAE 1080, inicialmente aquecido a 900 °C por uma hora.



Fonte: Modenesi *et al.*, 2012.

A literatura especializada apresenta inúmeros relatos de experiências de tratamento criogênico, que vão desde canos de armas, para melhorar precisão, até bolas de golfes tratadas em nitrogênio líquido, para melhorar o deslocamento delas em competições (MODENESI *et al.*, 2012). No aço a utilização de temperaturas abaixo de zero para melhorar as propriedades não é uma prática recente. Muitos metais melhoram as suas propriedades graças ao tratamento térmico apropriado, que lhes confere dureza, ductilidade, tenacidade, entre outros benefícios.

Nos últimos anos, ocorreu um aumento significativo na utilização do tratamento criogênico para melhorar a resistência ao desgaste e durabilidade de diversos materiais. Encontra-se na literatura uma série de relatos das experiências envolvendo o tratamento criogênico em diversas ligas metálicas. Esse processo foi desenvolvido para complementar outros tratamentos térmicos convencionais, possibilitando o aumento da competitividade das empresas, através da melhoria do desempenho dos produtos (VALES, 2010; SARTORI, 2009; HUANG *et al.*, 2003; BRYSON, 1999; BAILEY, 1971).

O tratamento criogênico em metais e ligas tem como finalidade melhorar uma ou mais propriedades quando submetido o material a temperaturas muito baixas, podendo variar de -60 °C a -196 °C (BARRON, 1982). Os benefícios dependem tanto da temperatura em que os metais são submetidos, quanto do tempo de permanência nessa temperatura (BAILEY, 1971). O tratamento criogênico é muito usado para obter melhoras na resistência ao desgaste e à fadiga, em engrenagens de motores e engrenagens de sistemas de transmissão (LEVINE, 2002). Esse tratamento é também utilizado para proporcionar alívio de tensões e para melhorar a qualidade de acabamento e estabilidade dimensional em ferramentas de precisão (DHAR *et al.*, 2001; YUN *et al.*, 1998; BAILEY, 1971; MAHMUNDI *et al.*, 2000).

O tratamento criogênico pode ser feito por imersão direta em nitrogênio líquido, sendo este processo considerado como molhado, ou a seco, quando o material não é imerso, mas mantido em uma atmosfera gasosa de nitrogênio (MOLINARI *et al.*, 2001; RHYIM, 2006). Os tratamentos em baixas temperaturas podem ser divididos em três tipos: tratamento subzero, tratamento criogênico e tratamento criogênico profundo (BRYSON, 1999; BAILEY, 1971).

Tratamento Subzero

Define-se como tratamento subzero aquele realizado em temperaturas na faixa de -60 °C a -80 °C, por alguns minutos ou algumas horas, com a utilização, por exemplo, de gelo seco, metanol ou freon; após submersão nesses fluidos, o material é reaquecido até a temperatura do início do processo, por convecção natural (BARRON, 1982; BAILEY, 1971).

Tratamento Criogênico

Consiste de tratamentos em temperaturas na faixa de -125 °C a -196 °C, por alguns minutos ou algumas horas, seguido por reaquecimento por convecção natural até a temperatura do início do processo (COLLINS, 1998). Esse método foi desenvolvido na década de 1960-1970 com o advento da tecnologia de baixas temperaturas, iniciando-se o uso do tratamento criogênico com temperaturas próximas de -196 °C, utilizando nitrogênio líquido (MOLINARI *et al.*, 2001).

Tratamento Criogênico Profundo

Conhecido também como tratamento ultrasubzero, esta técnica consiste em resfriamento lento e controlado, a partir da temperatura ambiente até -196 °C. O metal então é mantido durante um intervalo de tempo nestas condições e depois é reaquecido de forma lenta e controlada para evitar mudanças bruscas de temperatura que possam provocar o aparecimento de trincas e/ou tensões internas (WURZBACH & DEFELICE, 2004). Atualmente, existem equipamentos que são capazes de realizar o ciclo de resfriamento e aquecimento com maior controle de temperatura e maior repetitividade do processo, através do uso de computadores e softwares que controlam o fluxo de nitrogênio dentro da câmara de resfriamento (BENSELY, 2006).

Breve histórico do tratamento criogênico nos metais

Por séculos, na Suíça, a baixa temperatura das regiões alpinas foi utilizada para aperfeiçoar o comportamento do aço, que era submetido, por um longo período, a temperaturas negativas, o que resultou na melhoria de algumas de suas propriedades (VALES, 2010). Hoje, tem-se conhecimento que esse foi um processo rústico de envelhecimento acelerado pela baixa temperatura ambiente. Por essa razão, a Suíça produzia aço de qualidade diferenciada (BRYSON, 1999). Existem relatos de que os relojoeiros suíços colocavam as peças recém-fabricadas para seus relógios no frio da neve dos Alpes por longos períodos. Depois de montados, os relógios apresentavam maior exatidão, resistência aos desgastes das peças e melhor ajuste na montagem (BRYSON, 1999). O fenômeno responsável por essas mudanças nas propriedades dos aços é a diminuição da austenita retida e, conseqüentemente, o aumento da martensita (VALES, 2010).

No fim do século XIX, descobriram-se formas de liquefazer gases e, assim, ter acesso a temperaturas inferiores que se podiam alcançar anteriormente. No início do século XX, foi realizada uma série de experiências que procuravam melhorar as propriedades mecânicas do aço, mediante a sua imersão em gás liquefeito. Na maioria dos casos os resultados foram frustrantes uma vez que as peças partiam ou trincavam, devido ao choque térmico provocado pelo contato direto entre o aço e o gás liquefeito (GOBBI, 2009).

Desde 1930 estudos comprovam melhoria nas propriedades dos aços submetidos a tratamento criogênico. Inicialmente esses tratamentos eram realizados à temperatura de -80 °C. A peça era submersa em fluidos refrigerantes, objetivando a estabilização da martensita e a transformação da austenita retida após a têmpera. Entretanto, esse processo era limitado em -80 °C e não alcançava a linha Mf de alguns aços, sendo impossível a transformação completa da austenita retida em martensita (VALES, 2010).

Na União das Repúblicas Socialistas Soviéticas URSS, em 1937, Gulyaev propôs uma metodologia de tratamento a baixas temperaturas e foi considerado um dos primeiros métodos usados para eliminar a austenita retida presente em aços temperados (VALES, 2010). O mecanismo de resfriamento usado por Gulyaev (1937) era capaz de resistir à baixa

temperatura. Este mecanismo era feito por um equipamento constituído por duas caixas concêntricas, sendo a caixa interna feita de cobre, e a externa, de aço. O espaço entre as duas caixas era preenchido com substâncias refrigerantes, como dióxido de carbono, etanol, etileno e freon. No interior das caixas concêntricas era possível atingir temperaturas entre -80°C e -100°C , mantendo-as durante um intervalo de tempo de meia a uma hora (GULYAEV, 1937).

Foi durante a Segunda Guerra Mundial que ocorreu o maior desenvolvimento na pesquisa em tratamento criogênico no “Watertown Arsenal”, na cidade de Watertown, Massachusetts, nos Estados Unidos (BRYSON, 1999). Sob a orientação do Físico Clarence Melvin Zener, foram desenvolvidos mecanismos para estudar o comportamento do aço utilizando os princípios da Física do Estado Sólido. De acordo com o seu método, as ferramentas de corte de aço eram mergulhadas em nitrogênio líquido por um breve período de tempo, posteriormente eram retiradas do líquido e aquecidas naturalmente até a temperatura do início do processo, e em seguida utilizadas para fabricação de arsenal bélico, apresentando uma vida útil estendida (LEVINE, 2002).

Foi a partir da década de 1960 que se iniciaram os tratamentos criogênicos com vários estágios, utilizando um conjunto intitulado cold boxes, similar à metodologia utilizada por Gulyaev (1937), na qual as ferramentas eram refrigeradas lentamente por etapas até atingir as temperaturas criogênicas. O processo de resfriamento por estágio evitou a formação de trincas durante o resfriamento e proporcionou melhor resistência ao desgaste do aço (VALES, 2010).

No ano de 1972 foram feitos tratamentos térmicos em ferramentas prontas para o uso, pela imersão direta em nitrogênio líquido a -196°C , com duração de 10 minutos. Os testes nessas ferramentas foram feitos em 200 indústrias. Observou-se o aumento médio de 70% na vida útil das ferramentas (ZHMUD, 1980).

Bowes (1974) relatou um aumento de 46% na dureza e 30% na tenacidade para o aço rápido AISI T1 com a utilização de um tratamento criogênico denominado de Ellenite. Neste processo a temperatura criogênica é de -100°C , utilizando refrigeradores à base de convecção forçada de nitrogênio gasoso, após a têmpera, com um intervalo de tempo de dez a quinze minutos e posterior revenimento único.

Taylor (1978) descreve um processo de uso de temperaturas criogênicas conhecido como Cryotough, que consiste em duas etapas: na primeira, o metal é submetido a um pré-resfriamento com nitrogênio gasoso por três horas; na segunda, o resfriamento é feito com a imersão da peça em nitrogênio líquido a -196°C por 10 horas. Após o Cryotough, registrou-se aumento de até 200% na resistência da vida em fadiga dos metais.

Ainda na década de 1970, outros pesquisadores iniciaram uma técnica para compressão dos gases, tais como oxigênio ou nitrogênio, e perceberam que os invólucros que continham os gases melhoram algumas de suas propriedades físicas e mecânicas, comparados com os que permaneciam apenas em temperatura ambiente (-24°C). Essa observação também foi constatada pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) quanto às percepções das melhorias nos materiais das aeronaves espaciais após o retorno de suas missões (BOWES 1974).

Farina (2011) avaliou alguns dos efeitos da introdução das etapas do tratamento criogênico e o alívio de tensões no tratamento cíclico térmico do aço ferramenta AISI D2. O trabalho consistiu em verificar os efeitos dos tempos de permanência de 3, 10 e 30 horas em tratamento criogênico profundo (-196°C) e subzero (-80°C). Conclui-se que os carbonetos secundários (micrométricos) não apresentaram qualquer variação; os carbonetos secundários do revenido apresentaram-se mais finos e dispersos na matriz, nas amostras que receberam tratamento criogênico e sem alívio de tensões.

Ashiuchi (2009) investigou os efeitos do tratamento criogênico profundo na vida por fadiga sob condições de fretting no Al 7050-T7451. Esse material é utilizado na indústria aeronáutica para construção de nervuras de asas, trens de pouso e outros componentes de

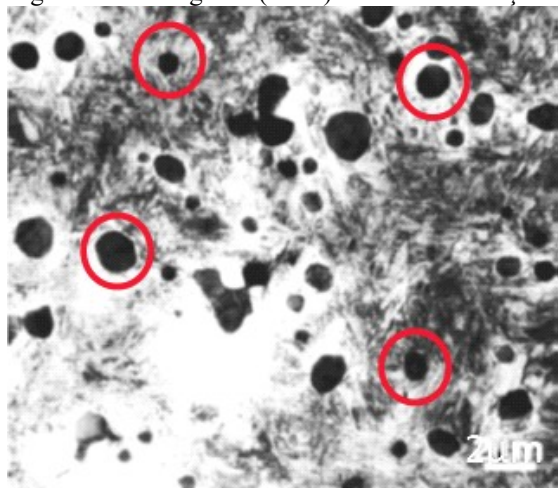
aeronaves. Observou-se que houve aumento da vida em fadiga – mais evidente para os corpos submetidos a tratamento criogênico profundo, que alcançaram 227% de sobrevivência em relação aos corpos não tratados sob condições nominalmente idênticas de carregamento. O tempo de imersão para o tratamento criogênico profundo foi de 12 horas.

Vales (2010) avaliou a influência do tratamento criogênico no aço AISI H13, e afirmou que o tratamento criogênico realizado em conjunto com os tratamentos térmicos, com têmpera e revenido, aumenta a tenacidade em 12% e melhora a resistência ao desgaste em 7%. Nesse estudo não observou influência no tempo de imersão em nitrogênio.

Uma simples explicação para o fenômeno envolvendo o tratamento com temperaturas criogênicas torna-se necessária para elucidar algumas alterações que ocorrem no aço. Existem duas hipóteses concorrentes para os mecanismos distintos, explicando os efeitos dos tratamentos criogênicos nos aços no que se refere a resistência ao desgaste e a tenacidade. A primeira defende que a única mudança que ocorre no aço durante o tratamento criogênico é a transformação da austenita retida em martensita. A segunda afirma que, além da transformação da austenita retida, ocorrem mudanças cristalográficas e microestruturais, que resultam em formação de precipitação e distribuição mais homogênea de carbonetos na microestrutura revenida. Como consequência desses efeitos, ocorre o aumento da dureza, da tenacidade e da resistência ao desgaste (COLLINS & DORMER, 1997).

Huang *et al.* (2003) realizaram análises microestruturais em aço rápido AISI M2, com e sem tratamento criogênico. Os corpos de prova – CPs foram austenitizados a vácuo a 1100 °C por uma hora. Em seguida, foram resfriados em nitrogênio líquido por uma semana. Em seguida os CPs foram revenidos a 200 °C. Na Figura 2 verifica-se a microestrutura obtida por microscopia eletrônica de transmissão de uma amostra submetida a tratamento criogênico, observando-se a precipitação de alguns carbonetos esféricos, destacados na imagem.

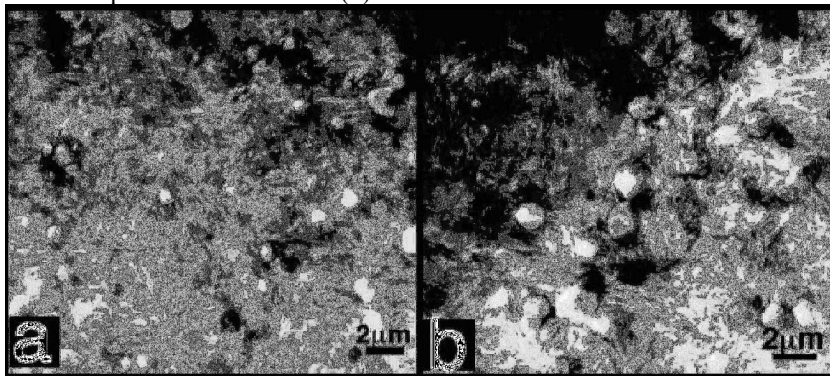
Figura 2 – Micrografia (MET) da amostra do aço AISI M2 tratada por processo criogênico.



Fonte: Huang *et al.*, 2003.

Duas imagens do mesmo material são reveladas na Figura 3, ambas de regiões diferentes de uma amostra que não sofreu tratamento criogênico.

Figura 3 – Micrografias de uma amostra em aço AISI M2 sem tratamento criogênico. Os carbonetos em (a) são menores que os carbonetos em (b).



Fonte: Huang *et al.* (2003).

Comparando-se as imagens das amostras de aço AISI M2, após revenimento ilustrado na Figura 2, com tratamento criogênico, e as Figura 3 (a) e (b), sem tratamento criogênico, verifica-se que, na amostra tratada por criogenia, os carbonetos têm diferentes tamanhos e encontram-se mais homogeneamente distribuídos, enquanto na amostra não tratada criogenicamente, a distribuição de carbonetos ocorre heterogeneamente, variando a forma dos carbonetos de região para região (HUANG *et al.*, 2003).

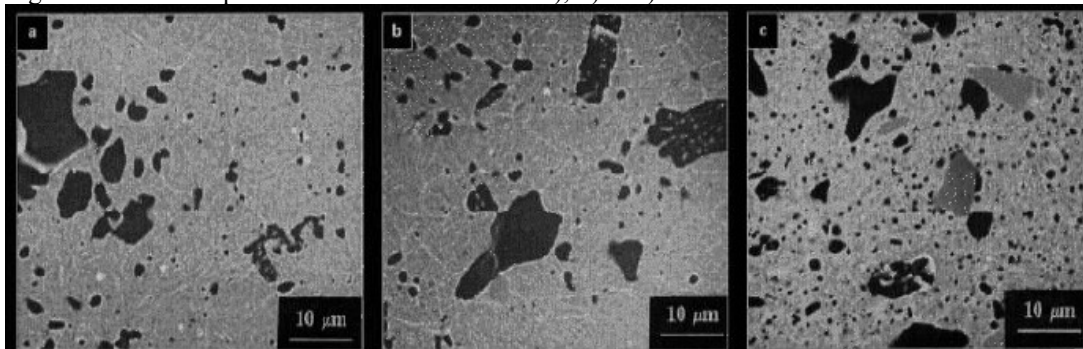
Os carbonetos observados na região da Figura 3 (a) são menores que 1 μm e os carbonetos verificados na região da Figura 3 (b) são maiores que 1 μm . Dessa forma, verificou-se que a fração volumétrica dos carbonetos das amostras que foram tratadas criogenicamente é superior quando comparada com as amostras que não tiveram o tratamento criogênico; também foi observado que a variação do tamanho dos carbonetos tratados criogenicamente é 6% menor quando comparados com as amostras sem tratamento criogênico (EBONI, 2010).

A precipitação de carbonetos de alta dureza nas amostras tratadas criogenicamente reduz o teor do carbono e dos elementos de liga na matriz, resultando no aumento da tenacidade do material (HUANG *et al.*, 2003).

Em outra análise microestrutural em amostras de aço AISI M2, Mahmudi *et al.* (2000) seguiram três roteiros distintos: i) têmpera e revenimento convencional; ii) têmpera, subzero a 203 K por uma hora e meia e revenimento; e iii) têmpera, criogênica a 77 K, por uma hora e meia e revenimento.

Na análise microestrutural, utilizando Microscopia de Varredura Eletrônica – MEV, Mahmudi *et al.* (2000) observaram que para os três roteiros de experimento as microestruturas eram semelhantes, porém o último roteiro, com o tratamento criogênico, apresentou maior quantidade de carboneto e com mais refinamento, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Microscopia feita no MEV dos roteiros i), ii) e iii).



Fonte: Mahmudi *et al.* (2000).

Para Sartori (2009) e Mahmudi *et al.* (2000), os efeitos do tratamento criogênico observados no último roteiro são:

- Um número expressivo de carbonetos ultrafinos na microestrutura;
- Diferente partição de elementos de liga entre a matriz e os carbonetos, comparados aos aços tratados convencionalmente;
- E consequentemente o aumento na resistência ao desgaste e tenacidade.

Alterações microestruturais originadas pelo processo criogênico

O tratamento criogênico vem sendo apresentado como um tratamento térmico com grandes efeitos nas propriedades dos aços-ferramenta. A literatura indica melhoras nas propriedades mecânicas, resistência ao desgaste e tenacidade dos aços (FARINA *et al.*, 2012). A literatura atualmente nos apresenta duas teorias concorrentes para explicar as alterações microestruturais após o tratamento criogênico. A primeira descreve que a mudança que ocorre no aço, durante o processo criogênico, resulta da transformação da austenita retida em martensita. A segunda teoria aponta que, além da transformação da austenita retida em martensita, ocorre também uma mudança na morfologia. O condicionamento da martensita em temperaturas criogênicas gera precipitados de carbonetos ultrafinos conhecidos como carbonetos η (eta) no revenido, sendo estes carbonetos responsáveis pelas alterações nas propriedades mecânicas do aço (EBONI, 2010).

Para Farina *et al.* (2012), os mecanismos propostos são mais amplos e estão relacionados com a (a) transformação martensítica, sendo eles: i) transformação da austenita retida (γ_R) em martensita (α); ii) decomposição e condicionamento da martensita; iii) transformação isotérmica da martensita; ou com (b) a precipitação ou aumento da fração volumétrica de carbonetos η . Estes mecanismos podem sobrepor-se, não ocorrendo de maneira isolada.

Existe falta de consenso sobre os mecanismos existentes nos processos criogênicos, no que tange às características mecânicas, corroboradas por alguns resultados contraditórios encontrados na literatura, gerando dúvida sobre os reais benefícios deste tratamento (FARINA *et al.*, 2012). Parte dessas divergências é devido à falta de informações detalhadas sobre os ciclos criogênicos utilizados.

Nos próximos itens, descreveremos algumas análises microestruturais, pós-tratamento criogênico.

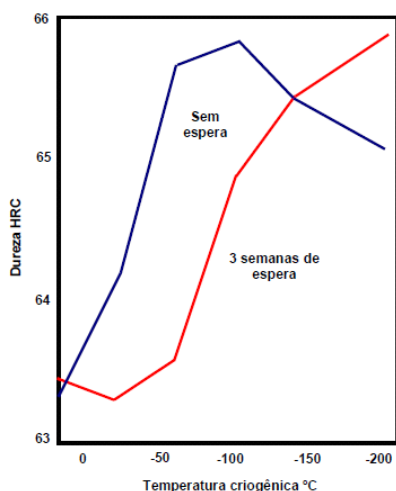
Transformação da austenita retida

A transformação da austenita retida, presente nos aços de alto carbono e aços-ferramenta, na fase martensita, resulta na precipitação de microcarbonetos, mecanismos responsáveis pelo aumento da dureza e resistência ao desgaste. Geralmente é o primeiro mecanismo dos tratamentos criogênicos em aços, desde que a austenita não tenha se estabilizado antes do tratamento criogênico, pela longa manutenção em temperatura ambiente após a têmpera (EBONI, 2010).

A austenita retida no aço é sensível à transformação em martensita nas operações de ordem de 273 K a 193 K, sendo que, entre 193 K e 77 K, somente um percentual muito pequeno de austenita se transforma (COLLINS, 1998).

A Figura 5 ilustra graficamente o tempo de espera do aço após a têmpera até o processo térmico subzero. Podemos observar que a dureza atingida nos corpos de prova submetidos a 193 K, logo após a têmpera, é superior em relação à dureza dos corpos de prova que aguardaram três semanas para realizar o tratamento subzero (COLLINS, 1998). Esta diferença de dureza demonstra a estabilização da austenita retida, sendo necessárias temperaturas criogênicas para a sua transformação e, mesmo assim, a transformação não será completa, como pode ser observado na Figura 5, pelas baixas durezas alcançadas (EBONI, 2010).

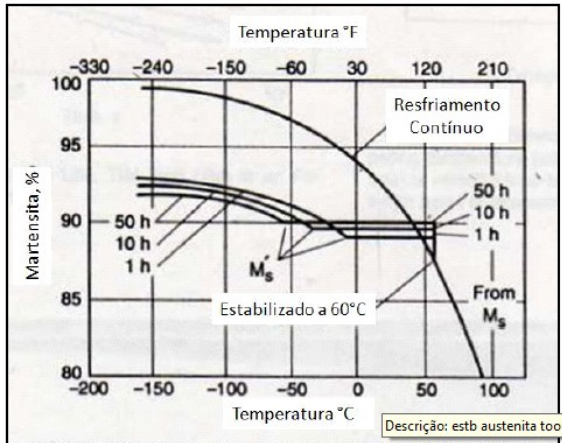
Figura 5 – Influência do tempo na transformação da austenita retida, avaliando a dureza no aço AISI D2 austenitizado a 1075 °C. Praticamente toda a austenita retida se transformou a -80 °C, mas a exposição por longo tempo na temperatura ambiente implica menores temperaturas criogênicas, para transformar a austenita.



Fonte: Adaptado de Colins (1998).

Outro exemplo da influência do tempo de espera antes do tratamento criogênico é apresentado por Farina (2011). Nesse exemplo, em um aço contendo 1,1%C 0,2%Si 0,3%Mn, quanto maior o tempo de permanência a 333 K, menor a quantidade de austenita retida a se transformar em martensita em temperaturas subzero, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Atraso na transformação martensítica em função do tempo e permanência a 333 K.



Fonte: Farina (2011).

A Figura 6 representa uma amostra com 10% de austenita retida, mantida por 50 horas a 333 K (60 °C); quando submetida a 123 K (-150 °C) por outras 50 horas, transformou apenas cerca de 2% da austenita retida em martensita (FARINA, 2011). Dessa forma, o tempo de espera entre um e outro tratamento térmico pode influenciar diretamente nas propriedades mecânicas do aço (Collins, 1998).

Vales (2010), no estudo da influência do tratamento criogênico no aço AISI H13, afirma que o tratamento criogênico realizado em conjunto com os tratamentos térmicos de têmpera e revenido pode aumentar a tenacidade e melhorar as propriedades de desgaste. Neste estudo, não houve influência positiva em relação ao tempo de permanência do banho criogênico.

O condicionamento da martensita ocorre devido ao resfriamento contínuo da martensita abaixo da sua temperatura de formação, em nitrogênio líquido, e a sua manutenção nessa

temperatura por um tempo suficiente para promover a formação de uma grande quantidade de carbonetos muito finos durante o revenimento; assim, quanto maior for o tempo de permanência em temperatura criogênica, maior a fração volumétrica de carboneto precipitado no revenimento (SARTORI, 2009).

Para Yun *et al.* (1998), resfriando o aço a 193K, é suficiente para transformar praticamente toda austenita retida em martensita. Os resultados dos tratamentos térmicos apresentam, além dessa transformação, a alteração da morfologia da martensita e a precipitação dos carbonetos ultrafinos, denominados como carbonetos η (SARTORI, 2009).

Tratamentos Criogênicos X Propriedades mecânicas

A forma como são combinados os tratamentos térmicos influencia diretamente nas propriedades dos aços, realizados através de diversos meios de transferência de calor, temperaturas variadas e em etapas diferentes do tratamento térmico. Assim, a escolha das propriedades mecânicas do aço está diretamente relacionada com a ordem e com o processo de resfriamento executado (MAHMUDI, *et al.* 2000).

Para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais, o tratamento criogênico não é a única etapa. A escolha da temperatura de austenização é fundamental para o condicionamento da martensita e das propriedades do material antes da têmpera (HUANG *et al.*, 2003).

Para obtenção do máximo da tenacidade e da resistência ao desgaste às temperaturas de austenização, devem ser inferiores as temperaturas usuais, para diminuir a quantidade da austenita retida; dessa forma, terão mais martensita, garantindo maior migração de carbono no condicionamento da martensita e precipitação de carbonetos η durante o ciclo de revenimento (COLLINS 1998).

Atualmente, com a crescente aceitação do tratamento criogênico para metais, vários fabricantes já oferecem equipamentos de processamento baseado em nitrogênio líquido, com taxas de resfriamento muito lentas em máquinas chamadas “processadores criogênicos” (LEVINE, 2002). Esses equipamentos são capazes de realizar o ciclo de resfriamento e aquecimento com maior controle de temperatura, utilizando computadores que controlam o fluxo de nitrogênio dentro da câmara de resfriamento. O tratamento, neste caso, é feito através de um resfriamento lento a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ em uma atmosfera gasosa em nitrogênio (processo a seco), mantendo-se nesta temperatura até por 60 horas, retornando lentamente à temperatura ambiente e posterior aquecimento a $196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (PAULIN, 1992).

O processo de tratamento criogênico, em maior ou menor grau, tem efeitos sobre uma ampla variedade de materiais. Além da aplicação em aços-ferramenta, o tratamento criogênico pode ser aplicável em outros materiais, tais como aços (ferramenta, rápidos, inoxidáveis, etc.), alumínio, cobre, materiais cerâmicos e poliméricos, materiais susceptíveis ao tratamento criogênico, com a finalidade de melhorar as suas características (GOBBI, 2009).

Mesmo com a disponibilidade dos equipamentos que realizam o processo a seco, o tratamento por imersão direta em nitrogênio líquido ainda é praticado. Diante dos diferentes tipos de tratamentos criogênicos, os resultados obtidos por imersão direta em nitrogênio líquido, em geral, são favoráveis ao aumento do desempenho dos aços-ferramenta (COHEN & KAMONDY, 1998).

É importante destacar que o tratamento criogênico se trata de um tratamento térmico e, por consequência, afeta permanentemente todo o volume do material tratado, o que implica que o material ou ferramenta pode ser usinado, afiado ou modificado, sem perdas de características, diferente do que aconteceria com um tratamento superficial ou revestimento, exceto se um novo processo, como uma retêmpera, seja aplicado, causando mudanças drásticas no material. De modo geral, uma vez realizado o tratamento criogênico no material, não será necessário voltar a tratá-lo (MOHAN *et al.*, 2001).

Conclusões

Ao final das análises e estudos sobre os benefícios do tratamento criogênico, pode-se afirmar que o número de aplicações deste processo é praticamente ilimitado. Situações em que existam problemas de desgaste ou fadiga podem constituir uma oportunidade para aplicar com êxito essa metodologia. As inúmeras aplicações abrangem os setores de usinagem, corte, soldagem, siderurgia, automação, indústria química, componentes eletrônicos, etc. Também existem aplicações em materiais de outros campos, tais como material desportivo, instrumentos musicais, áudio, armas de fogo, etc.

As principais alterações nos metais para aumento da dureza e resistência ao desgaste são:

1. Os tratamentos criogênicos nem sempre são suficientes para eliminar completamente a austenita retida quando há a etapa de alívio de tensões logo após a têmpera.
2. Em alguns metais é necessária a inserção de duplo revenimento após o tratamento criogênico, para reduzir a presença de austenita retida na matriz martensítica.
3. Durante o tratamento criogênico, ocorre envelhecimento da martensita, propiciando um refinamento dos carbonetos.

Referências

ASHIUCHI, E. S. **Influência do tratamento criogênico na fadiga sob condições de fretting no AL 7050-T7451**. 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

BAILEY, C. A. **Advanced Cryogenics**. 3. ed. New York: Plenum Publishing Co., 1971.

BARRON, R.F. Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance. **Cryogenics**, v. 22, n. 8, p. 409-13, ago. 1982.

BENSELY, A. *et al.* Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment. **Cryogenics**, v. 45, p. 747-754, 2006.

BOWES, R.G. **The Theory and Practice of SubZero Treatment of Metals**. **Heat Treatment of Metals**, vol. 1, n.º 1, pp. 29-32, 1974.

BRYSON, W. E. **Cryogenics**. **Cincinnati**: Hanser Gardner Publications, 1999.

COHEN, P.; KAMODY, D. Cryogenics goes deeper. **Cutting tool Engineering**, v. 50, n. 7, pp. 46-50, 1998.

COLLINS, D. N. Cryogenic treatment of tool steels. **Advanced Materials & Processes**, v. 12, p. H23-H29, 1998.

COLLINS, D. N.; DORMER, J., Deep Cryogenic Treatment of a D2 Cold-work tool steel. **Heat Treatment of Metals**, p. 71-74, 1997.

DHAR, N.R.; PAUL, S.; CHATTOPADHYAY, A.B. The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steels. **Wear**, v. 249, c. 10–11, p. 932-942, 2001.

FARINA, P. F. S. **Efeito das adições de tratamentos criogênicos e de alívio de tensões no ciclo térmico do aço ferramenta AISI D2.** 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GOBBI, S. J. **Influência do tratamento criogênico na resistência ao desgaste do aço para trabalho a frio AISI D2.** 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

GULYAEV, A.P. Improved Methods of Heat Treating High Speed Steels to Improve he Cutting Properties. **Metallurg**, n. 12, p. 65, 1937.

HUANG, J.Y.; ZHU, Y.T.; LIAO, X.Z.; BEYERLEIN, I.J.; BOURKE, M.A.; MITCHELL, T.E. Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel. **Materials**
LAKHTIN, Y. Engineering Physical Metallurgy. Moscow: Mir, 1975.

LEVINE, J. Cryo processing equipment. Heat Treating Progress. **Heat Treating Progress**, jan. 2002. Disponível em: <http://www.metal-ear.com/Heat%20Treating%20Progress%20Article.htm>. Acesso em: nov. 2013.

MAHMUNDI, R., GHASEMI, H.M, FARADJI, H.R. Effects of Cryogenic Treatments on the Mechanical Properties and Wear Behaviour of High-Speed Steel M2. **Heat Treatment of Metals**, v. 2 p. 69-72, 2000.

MODENESI P. J, MARQUES P. V., SANTOS D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem.** Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte, p. 209, 2012.

MOHAN L.; RENGANARAYANAN, S.; KALANIDHI. A.; **Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steel.** In: Cryogenics, v.41, p.149-155, 2001.

MOLINARI, A.; PELLIZZARI, M.; GIALENELLA, S.; STRAFFELINI, G.; STIASNY, K.H. Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 118, p. 350-355, 2001.

PAULIN, P. Cold Cuts. **Cutting tool Engineering**, v. 44, n. 5, p. 61-66, 1992.

PELLIZZARI, M., **Effetto del trattamento criogenico sulle propriet. microstruturali dell'accio AISI H13**, La Metallurgia Italiana, Vol. 1., pp. 21-27, 2001.

RHYIM, Y.-M. et al. Effect of deep cryogenic treatment on carbide precipitation and mechanical properties of tool steel. **Solid State Phenomena**, v. 118, p. 9-14, 2006.

SANTOS, C. N. **Aspectos cristalográficos da transformação martensítica de uma liga Fe-27%Ni.** Tese (Doutorado) – Instituto Militar de Engenharia Instituto Militar de Engenharia Rio de Janeiro, 2008.

SARTORI, C. H. **Influência dos tratamentos térmicos e tratamentos criogênicos na tenacidade do aço rápido AISI M2.** 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

TAYLOR, J. **Cold Plunge Gives Tools an Extra Lease of Life**, Metalworking Production, n.º 122, vol.5, pp.73-77, 1978.

VALES, S. S. **Estudo da Influência do Tratamento Criogênico no Aço AISI H13**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação Integridades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

WURZBACH, R. N.; DEFELICE, W. **Improving component wear performance through cryogenic treatment**. In: Lubrification Excellence, Noria Corporation, 2004.

YUN, D.; XIAOPING, L.; HONGSHEN, X. Deep cryogenic treatment of high speed steel and its mechanism. **Heat Treatment of Metals**, v. 3, p., 55-59, 1998.

ZHMUD, E. S. Improved Tool Life After Shock Cooling. **Metal Science and Heat Treatment**, v. 22, n. 10, p. 701-703, 1980.

ZHU, J.S.; GOTTHARDT, R. New phase transition peak in NiTi alloy. **Physics Letters A**, v. 132, n. 5, p. 27