



University of
Texas Libraries



e-revist@s

Sumários.org



Centro Unversitário Santo Agostinho

revista fsa

www4.fsnet.com.br/revista

Rev. FSA, Teresina, v. 21, n. 7, art. 9, p. 174-187, jul. 2024

ISSN Impresso: 1806-6356 ISSN Eletrônico: 2317-2983

<http://dx.doi.org/10.12819/2024.21.7.9>

DOAJ DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

WZB
Wissenschaftszentrum Berlin
für Sozialforschung



Zeitschriftendatenbank



A Ciência da Têmpera do Aço - História e Tecnologia

The Science of Steel Quenching - History and Technology

Alessandro de Souza Carneiro

Doutor em Física para Universidade de São Paulo
Professor do Instituto de Física pela Universidade Federal de Catalão
E-mail: alessandrocarneiro@ufcat.edu.br

Endereço: Alessandro de Souza Carneiro
Universidade Federal de Catalão – Ufcat. Av. Dr.
Lamartine P. de Avelar, 1120, Setor Universitário,
CEP: 75704-020 Catalão/Go, Brasil.

Editor-Chefe: Dr. Tonny Kerley de Alencar Rodrigues

Artigo recebido em 28/05/2024. Última versão recebida em 10/06/2024. Aprovado em 11/06/2024.

Avaliado pelo sistema Triple Review: a) Desk Review pelo Editor-Chefe; e b) Double Blind Review (avaliação cega por dois avaliadores da área).

Revisão: Gramatical, Normativa e de Formatação



RESUMO

Inicialmente é feita uma breve revisão histórica relacionada à descoberta do ferro. Estudos de artefatos, como lâminas de ferramentas e armas de mais de 1000 anos a.C. permitiram concluir que já existia o conhecimento para aumentar a dureza dos metais, tanto devido ao aumento do teor de carbono quanto pelo resfriamento brusco a partir de altas temperaturas (processo denominado de têmpera ou endurecimento). Isso sugere que havia um grau considerável de sofisticação por parte desses primeiros ferreiros. Na sequência é apresentado o básico da teoria de materiais e formação da estrutura cristalina de ferro-carbeto de ferro (Fe-Fe₃C), com base no diagrama de fases. Modernamente, a ciência de materiais mostrou que o aumento da temperatura altera a estrutura atômica da ferrita (ferro puro com estrutura CCC) para austenita (FCC), o que permite a inclusão de outros elementos, como o carbono, por exemplo. O processo de têmpera, por outro lado, altera bruscamente a estrutura atômica de austenita para martensita (TCC), mantendo o carbono preso à estrutura final e conferindo ao novo material um aumento significativo de dureza. Embora o contexto do artigo seja, à primeira vista, histórico, o tratamento térmico controlado do aço é essencial para o mundo moderno e é utilizado para garantir que ele tenha as propriedades desejadas na indústria de modo geral.

Palavras-chave: Aço. Estrutura Cristalina. Transição de Fase. Têmpera. Martensita.

ABSTRACT

Initially, a brief historical review related to the discovery of iron is made. Studies of artifacts such as tools blades and weapons from more than 1000 years BC, allowed us to conclude that the knowledge already existed to increase the hardness of metals, both due to the increase in carbon content and sudden cooling from high temperatures (a process called tempering or hardening). This suggests that there was a considerable degree of sophistication on the part of these early blacksmiths. Next, the basics of materials theory and formation of the crystalline structure of iron- carbide iron (Fe-Fe₃C) based on the phase diagram are presented. Modernly, materials science has shown that increasing temperature changes the atomic structure of ferrite (pure iron with BCC structure) to austenite (FCC), which allows the inclusion of other elements, such as carbon, for example. The quenching process, on the other hand, abruptly changes the atomic structure from austenite to martensite (BCT), keeping the carbon attached to the final structure, giving the new material a significant increase in hardness. Although the context of the article is, at first glance, historical, the controlled heat treatment of steel is essential for the modern world and is used to ensure that it has the desired properties in industry in general.

Keywords: Steel. Crystal Structure. Phase Transition. Quenching. Martensite.

1 INTRODUÇÃO

A produção de metais é provavelmente uma das ciências mais antigas conhecidas pela humanidade. Antigos registros arqueológicos do uso de ferro pelo homem, encontrados em Samarra, Iraque, datam de aproximadamente 5000 a.C. (TYLECOTE, 2002). Entretanto, acredita-se que o uso de cobre antecede o de ferro em milênios. Isto decorre da natureza das fontes de cobre. Diferente do ferro, o cobre era encontrado com frequência em seu estado nativo, isto é, no estado metálico. Assim, sem necessidade de qualquer processo complexo era possível produzir os mais variados utensílios domésticos, decorativos e artísticos (TYLECOTE, 2002). O cobre tornou-se absolutamente crucial nos reinos antigos e medievais do Irã, Egito, da Anatólia (atualmente Turquia), das civilizações gregas e romana, da China, Índia, Europa e Japão (WERLTIME, 1964; WERTIME, 1973). A invenção do bronze é frequentemente considerada uma das grandes revoluções tecnológicas da humanidade. Produzido a partir da adição de estanho ao cobre, na proporção de até 10% em massa, leva a um drástico aumento na resistência, estendendo enormemente sua aplicação. O bronze começou a ser produzido e trabalhado na última fase da Pré-História, chamada de Idade do Bronze, que ocorreu entre 4000 e 1500 a.C. Os povos antigos utilizavam o bronze para confecção de armas (espadas, capacetes, lanças, facas, martelos etc.), confecção de estátuas, joias. Houve ainda a adição de antimônio, níquel e bismuto ao cobre. Vale ressaltar que o ferro foi, provavelmente, descoberto como um subproduto do processo da fundição de cobre e chumbo bem como a descoberta de outros metais: arsênio, antimônio, bismuto, estanho e óxidos de zinco (WERTIME, 1973).

O processo de extração do ferro de seus minérios, processo muito mais difícil do que fundir cobre e estanho (~ 900 °C), mudou totalmente a humanidade a partir de 1.200 a.C., marcando o início da Idade do Ferro. Uma série de artefatos de ferro, cobrindo um período aproximado de 1000 a.C. a 1000 d.C., foram examinados metalograficamente. Concluiu-se que houve pouca mudança na fabricação de ferro durante este período de 2000 anos (PENSE, 2000). O ferro primitivo era extraído do minério de ferro por meio de fornos construídos de argila resistentes ao fogo cujo funcionamento era semelhante ao dos altos-fornos atuais, contudo, incapazes de gerar temperaturas suficientemente altas para produzir ferro líquido (acima de 1500 °C). Em vez disso, o produto final do processo era ferro esponja (ferro metálico parcialmente fundido com baixo teor de carbono) misturado com escória de silicato e carvão acumulados no fundo do forno. Essa massa de ferro dúctil (flexível) era então forjada

(martelada a quente) para liberação de escórias (impurezas), sendo depois refundido em pequenos cadinhos de argila e deixados para resfriar lentamente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Devido à variação do minério de ferro e a habilidade de cada artesão, a produção do aço era muitas vezes de baixa qualidade e de produção limitada (MACKENZIE, 2008). A utilidade desse novo material só foi ampliada com o desenvolvimento de técnicas que aumentaram sua resistência mecânica. Provavelmente, a prática acumulada de anos mostrou que, deixando a peça forjada em contato com carvão a altas temperaturas, uma progressiva carburação do ferro ocorreria por difusão do carbono da superfície para seu interior (processo de cementação¹), transformando-o em um novo material: o aço, liga de ferro e carbono (TYLECOTE, 2002). O carbono, introduzido no ferro dessa forma, promove um aumento da dureza da peça após a têmpera, processo que será detalhado à frente, usando um contexto histórico. Embora a dureza estivesse restrita às camadas superficiais da peça em decorrência da difusão do carbono no estado sólido, foi particularmente relevante para a produção de alguns artefatos, especialmente lâminas de ferramentas e armas (MACKENZIE, 2008; PENSE, 2000; SCOTT, 1992; TYLECOTE, 2002).

Neste sentido, Mackenzie (2008, p. 68) chama a atenção para textos de antigos autores, como Heródoto, Xenofonte e Estrabão e para achados arqueológicos que sugerem que trabalhos com ferro foram desenvolvidos no Oriente Médio, perto do planalto da Anatólia, pelos hititas, entre 1400 e 1200 a.C. Provavelmente, uma das primeiras referências à fundição e à ferramentaria vieram do Antigo Testamento, em Gênesis 4:22 “[...] Zillah também teve um filho, Tubal-Caim, que era um artífice de bronze e ferro”.

Conclui-se que, de alguns artefatos, especificamente lâminas de ferramentas e armas (facas, espadas, pontas de lanças e flexas), os hititas não só produziram ferro regularmente, mas também sabiam como cementá-lo para aumentar sua força. Isso tornaria o ferro forte, o suficiente para ser eficaz contra armas de bronze. Se isso é verdade, um mínimo de conhecimento empírico de como aquecer o ferro em atmosfera de cementação (provavelmente sobre o leito de carvão em brasa) deve ter existido; embora nada indique que tivessem

¹ Cementação: Consiste em introduzir maior quantidade de carbono em superfícies de aço com baixos teores desse elemento. É indicada para aços-carbono ou aços-ligas cujo teor original de carbono é inferior a 0,25%. Na cementação, a peça é colocada em contato com substâncias ricas em carbono que podem ser de origem sólida, gasosa, líquida ou plasma a altas temperaturas por longos períodos de tempo.

qualquer compreensão teórica dos efeitos do seu esforço no processamento metalúrgico (PENSE, 2000). Outro antigo referencial sugere um conhecimento precoce dos efeitos de têmpera para aumentar a resistência. Isso é baseado em uma tradução da Odisseia de Homero (cerca de 800 a.C.), em que os artesãos, após terminarem o processamento do metal, o aqueciam até ficar totalmente vermelho e o mergulhavam em água fria para torná-lo forte (MACKENZIE, 2008).

Vale ressaltar que grande parte da história da têmpera é desconhecida até o século XV porque não foi devidamente escrita ou está envolta em misticismo. Acredita-se que isso foi resultado da educação geral do povo e do desejo de muitos ferreiros e guildas de protegerem seus conhecimentos. Só muito mais tarde é que detalhes importantes do processo de têmpera foram revelados através de estudos, pesquisa e muita experimentação (MACKENZIE, 2008; PENSE, 2000). Um dos mitos antigos mais difundidos era de que o sangue produziria propriedades mágicas em uma lâmina. Contudo, foi demonstrado que o sangue gera uma curva de resfriamento muito lenta, incapaz de endurecer os aços simples disponíveis para os primeiros ferreiros. Água e urina eram os únicos agentes de têmpera capazes de tratar termicamente os aços daquela época (MACKENZIE, 2008).

Isso posto, ressalta-se que foi a curiosidade sobre os mecanismos envolvidos com a têmpera bem como sobre alguns fatos históricos, relacionados com armas antigas feitas em aço, e a cutelaria bastante divulgada atualmente que impulsionaram este estudo e a escrita deste artigo.

Por volta de 500 a.C., a tecnologia metalúrgica do ferro, inicialmente localizada no mundo árabe, foi difundida pela Europa e, em meados de 400 a.C., chegando à China, Índia e Japão, aparentemente levada pelo comércio (TYLECOTE, 2002). Embora os ferreiros de armadura europeus viessem melhorando e aperfeiçoando gradativamente seu ofício, os Cruzados do século XII não tinham aço que se igualasse à metalurgia islâmica (MACKENZIE, 2008). Por outro lado, a espada japonesa era ainda superior à espada islâmica.

De fato, é antiga a preocupação do homem em possuir metais de qualidade e resistentes. Em guerras antigas, exércitos com espadas e outros armamentos metálicos levavam desvantagem bélica quando não tratavam termicamente seus arsenais, tornando-os vulneráveis no momento de repararem suas armas de ferro danificadas (PENSE, 2000). Efetivamente, as civilizações que conseguiram fazer uso significativo do ferro em ferramentas, armamentos, construção e mecânica, estavam em uma posição muito melhor para sobreviver, desbravar e prosperar. Todavia, o homem necessitou de muitas gerações para

lidar de modo mais eficaz com o calor e com os meios de resfriamento dos metais nas várias etapas de um tratamento térmico (SLAUGHTER; GOLDENSTEIN, 2014; WERTIME, 1973). A partir do século XV, a energia hidráulica foi usada para bombear ar nos fornos, aumentando a temperatura para mais de 1200 °C, criando um ferro líquido rico em carbono, conhecido como ferro fundido (HOCKING, 1985; PENSE, 2000).

Atualmente, os processos metalúrgicos são obviamente mais avançados, mas, em geral, os processos envolvidos na metalurgia permanecem os mesmos: separar o metal de seus minérios usando fornos, fazer a adição de carbono e/ou outros metais em diferentes fornos. De fato, apenas após 1850 d.C., foi que a ciência começou a compreender e quantificar o mecanismo relacionado ao tratamento térmico. O processo de temperabilidade do aço², formação de martensita³ e outros mecanismos precisaram esperar o desenvolvimento de ferramentas capazes de inferir sobre as propriedades estruturais da matéria como a área de difração e microscopia eletrônica de transmissão para entender fenômenos, como a cristalização e crescimento de grãos nos metais, por exemplo (VALE, 2011).

Na próxima seção, será discutido como uma mudança microestrutural da rede cristalina do ferro-carbono pode, através da têmpera, resultar no endurecimento do material.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Diagrama de Fases do Ferro-Carbono e Definições Cristalográficas

Os materiais cristalinos podem ser descritos por um arranjo repetitivo (periódico) de átomos ou íons ao longo de grandes distâncias atômicas, de tal modo que, quando ocorre a solidificação devido ao resfriamento, os átomos se posicionam em um padrão tridimensional repetitivo, no qual cada átomo está ligado aos seus átomos vizinhos mais próximos. Todos os metais, muitos materiais cerâmicos e certos polímeros formam estruturas cristalinas sob certas condições normais de solidificação (C. KITTEL, 2005; CALLISTER, 2002). Convém ressaltar que os metais, de um modo geral, são agregados cujos cristais tanto podem ser

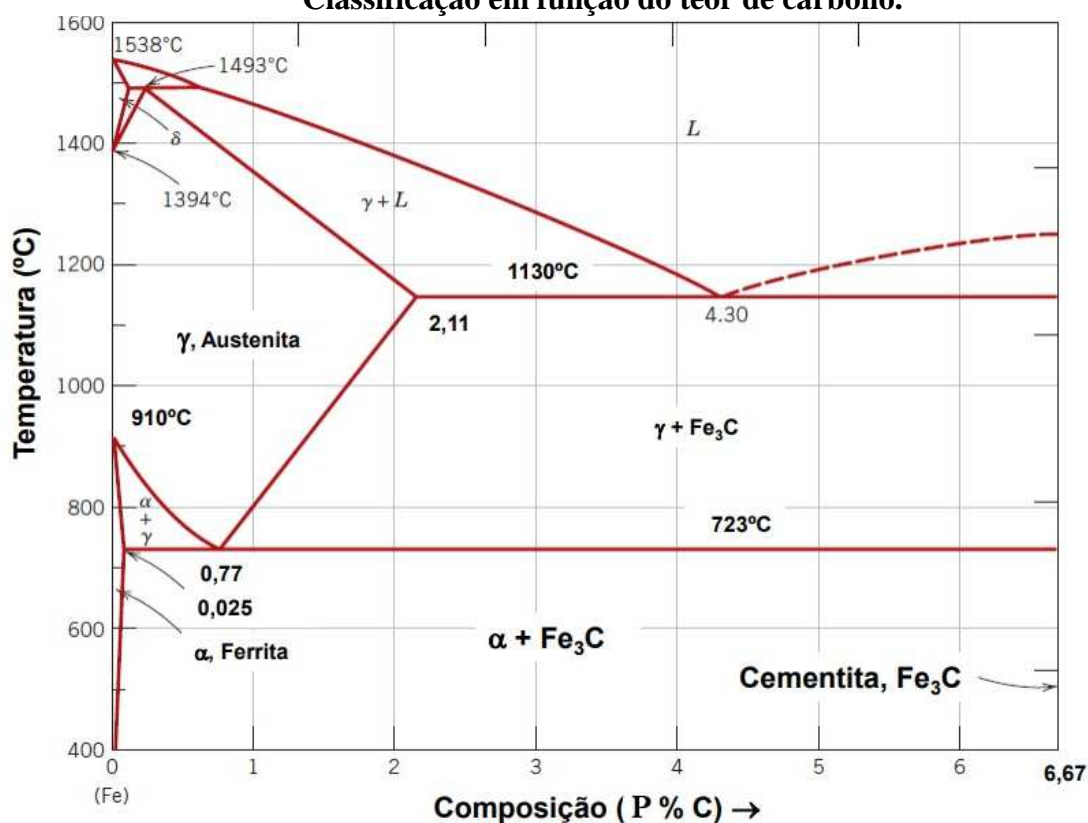
² Temperabilidade do aço: Certos elementos de liga podem aumentar muito a temperabilidade de aços como níquel (Ni), cromo (Cr) e molibdênio (Mo). A temperabilidade está diretamente relacionada à capacidade de um metal de formar estrutura martensítica após a têmpera, o que indica o quanto de dureza pode ser alcançada.

³ Martensita: Submetido a um resfriamento suficientemente brusco, o material sofre uma transformação em sua estrutura cristalina, convertendo a austenita (estrutura cúbica de faces centradas) em martensita (estrutura tetragonal de corpo centrado). Este novo arranjo microestrutural é o responsável pelo ganho de dureza relacionado à formação de martensita no processo de t.

quimicamente idênticos como ser de composição química diferente. São idênticos no caso do ferro, cobre, alumínio etc., puros, ou então em soluções sólidas apresentadas por certas ligas, por exemplo, a de cobre e níquel. E são distintos nos demais casos, entre os quais estão as ligas de ferro e carbono (COLPAERT, 1959).

Para compreender como o tratamento térmico interfere na estrutura das ligas de ferro-carbono, é necessário conhecer o seu diagrama de fases. Existe forte correlação entre a microestrutura dos materiais e as propriedades mecânicas. A Figura 1 mostra o diagrama de equilíbrio do ferro-carbeto de ferro ou cementita (Fe_3C), que limita à esquerda a quantidade em massa de carbono em 0% e à direita em 6,7%. Os materiais são chamados aços quando contêm de 0 a 2,1% de carbono e ferro fundido quando o teor desse elemento varia entre 2,1 e 6,7% (COLPAERT, 1959).

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio das ligas de ferro-carbono. Classificação em função do teor de carbono.

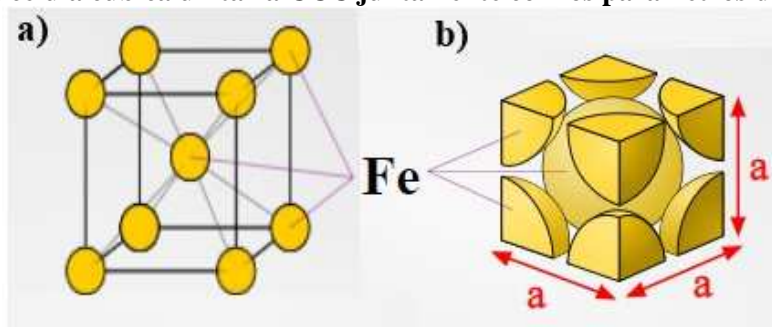


Fonte: Adaptado da referência (CALLISTER, 2002).

Considerando primeiro o sistema de ferro puro, ou seja, sem carbono. O ferro possui 3 formas alotrópicas⁴ ou *ferrites*: alfa (α), gama (γ) e delta (δ). A Fig. 2(a) mostra uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), comum ao Fe à temperatura ambiente, conhecida como ferrita ou ferro α . Na estrutura CCC, cada átomo posicionado em um dos vértices participa de 8 células cúbicas vizinhas. Assim, cada vértice contribui com 1/8 de átomo para cada célula unitária, como mostrado na Fig. 2(b). Incluindo o átomo central, a célula unitária possui ao todo dois átomos resultando em um fator de empacotamento (FE) de 0,68%, ou seja, apenas 68% da célula unitária é efetivamente preenchida por átomos. Quando ferro puro é aquecido a altas temperaturas, há uma mudança significativa da estrutura atômica, resultando em uma transformação alotrópica⁴ ou polimorfismo (CALLISTER, 2002). Ocorre que, em 910 °C, as ligações entre os átomos de ferro são relaxadas do seu estado CCC (Fig. 2(a)) e transformadas em uma estrutura cúbica de faces centradas (CFC), representada na Fig. 3(a). Nessa nova fase, os átomos de Fe ocupam os vértices e os centros das faces de forma estável até 1394 °C; tal estrutura é conhecida também como austenita ou ferro γ , com a faixa de temperatura indicada na Fig.1. Além disso, no processo de aquecimento, o ferro α deixa de ser magnético entre 768 e 910 °C. Isso ocorre em uma determinada temperatura crítica (temperatura de Curie), quando o comportamento ferromagnético é alterado com a perda de alinhamento dos momentos magnéticos intrínsecos do material. Assim, acima da temperatura crítica, o ferro não é mais magnetizável, isto é, deixa de ser atraído por um ímã. Note que a estrutura CFC possui 14 átomos no arranjo cristalino. Contudo, como a Fig. 3(b) evidencia, apenas metade de cada átomo de Fe das faces encontram-se no interior da célula unitária e, somada à contribuição dos vértices, a estrutura CFC possui 4 átomos, resultando em um FE de 0,74%.

⁴ Alotropia: Materiais que apresentam mais de uma forma cristalina devido a fatores como variações da temperatura ou pressão. Metais de grande importância industrial como o ferro, titânio e o cobalto apresentam transformações alotrópicas em temperaturas elevadas.

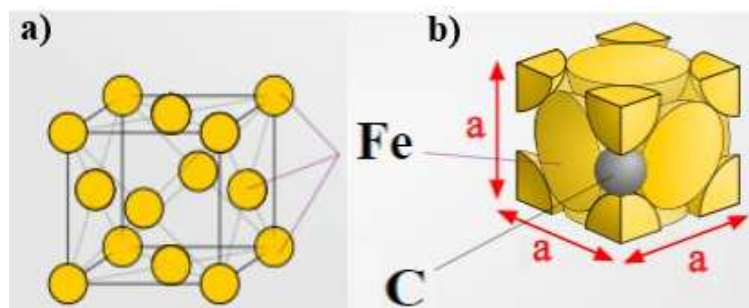
Figura 2. (a) Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), denominada ferrita. (b) Vista da célula cúbica unitária CCC juntamente com os parâmetros de rede.



Fonte: Adaptado da referência (OHL, [s.d.]).

Finalmente, entre 1394 °C e a temperatura de fusão do ferro (1538 °C), a estrutura volta ser uma CCC, pois é mais estável e, embora seja idêntica ao ferro α , é denominada ferro δ . A diferença entre as estruturas CCC do ferro α e δ ocorre nos valores dos parâmetros de rede. Na faixa de temperaturas mais altas, os parâmetros de rede maiores, geram uma célula unitária de volume maior (C. KITTEL, 2005; CALLISTER, 2002; COLPAERT, 1959). Todas essas mudanças de fase ficam evidentes ao longo do eixo vertical, à esquerda, no diagrama de fases.

Figura 3. (a) Estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC), denominada de austenita. (b) Vista da célula unitária CFC com um átomo de carbono intersticial.

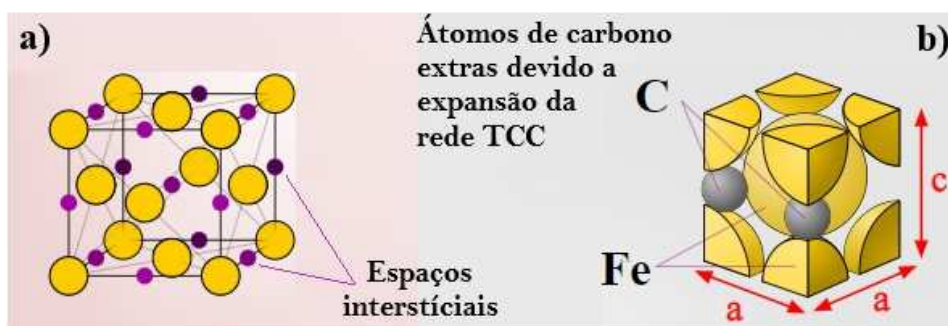


Fonte: Adaptado da referência (OHL, [s.d.]).

Na estrutura da ferrita (ferro α) existente até a temperatura de 910 °C, a solubilidade de carbono é muito baixa, chegando ao máximo de 0,025% a 727 °C, como mostrado na Fig. 1.

Isso ocorre porque os átomos que compõem a estrutura se organizam próximos entre si, tornando difícil a acomodação de átomos de carbono na rede cristalina. Contudo, a adição de carbono ao ferro provoca modificações nas temperaturas das transformações alotrópicas, pois o carbono age como estabilizante da fase γ do ferro (austenita) (COLPAERT, 1959). Note que à medida que o teor de carbono aumenta até 0,77%, a temperatura de austenitização é decrescente, como indica a curva A_3 na Fig. 1 do diagrama de fases. Abaixo da curva A_3 , ocorre uma região de transição de fases em que coexistem ambas as fases ($\alpha + \gamma$). A estrutura da austenita com mais átomos de Fe na célula unitária possui mais sítios intersticiais (espaços vazios entre átomos), o que permite a ligação do carbono ao ferro em diferentes posições modificando a estrutura química da rede, como mostra a Fig. 4(a). Devido ao aumento da quantidade de sítios intersticiais, os átomos de carbono se movem mais livremente em torno do ferro em temperaturas elevadas, ou seja, nessas condições, a difusão dos átomos de carbono é aumentada, podendo a solubilidade da fase austenita chegar aos 2,1% em altas temperaturas (CALLISTER, 2002; COLPAERT, 1959; VALE, 2011).

Figura 4. (a) Sítios intersticiais de uma estrutura CFC também denominada de austenita. (b) Estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), fase denominada martensita.



Fonte: Adaptado da referência (OHL, [s.d.]).

3.2 Processo de Têmpera

A têmpera é um método usado para tornar os metais mais fortes e resistentes, portanto, mais duráveis. Diferente do que ocorreu com outras ciências puras ao longo da história, a metalurgia beneficiou-se e desenvolveu-se da valiosa interação entre conhecimento empírico e teoria, exatamente nesta ordem (WERLTIME, 1964). Nesse contexto, a têmpera do aço, por falta de conhecimento da microestrutura dos materiais, à época, foi provavelmente uma

descoberta empírica obtida dos processos de produção do ferro e aço, sendo dominada apenas por volta do séc. XII ou XIII a.C. (DURAND-CHARRE, 2004). Modernamente, sabe-se que o aço, após aquecido até sua austenitização (transição de fase CCC para CFC), pode apresentar carbono diluído nos sítios intersticiais, como indicado na Fig. 4(a). De modo prático, até hoje os cutedeiros usam a perda de magnetismo do aço acima da temperatura de austenitização como marcador da mudança estrutural, indicando o momento e a temperatura certas para a realização da têmpera.

Salienta-se que a têmpera permite uma rápida mudança de ambiente para um aço, de alta para baixas temperaturas, usando um líquido refrigerante, como óleo ou água. Tal processo resulta em uma transição martensítica que apresenta estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro representada pela Fig. 4(b). Nesse processo, a fase martensita nucleia e cresce rapidamente, atuando para reter o carbono (ou outros elementos) no meio, pois não há tempo suficiente para a difusão para fora do aço antes de uma mudança na estrutura cristalina. Com esses átomos de carbono presos na estrutura cristalina, tem-se uma estrutura CCC alterada conhecida como martensita (TCC) (CALLISTER, 2002; DURAND-CHARRE, 2004; VALE, 2011). Esse arranjo microestrutural é responsável pelo ganho de dureza relacionado à martensita, um material extremamente duro, mas frágil. A experiência com esses materiais na antiga Idade do Ferro levou ao conhecimento de que a fragilidade, que torna o material quebradiço, poderia ser reduzida reaquecendo o material a temperaturas relativamente baixas (~250 °C) durante algum tempo, processo conhecido como revenido. Tal procedimento é responsável por reduzir as tensões internas introduzidas pela transformação martensítica. Assim, melhora-se suas propriedades mecânicas, em que parte da dureza é sacrificada para obter ductilidade (flexibilidade) e tenacidade (resistência) adequadas. Isso é feito temperando o aço martensítico (COLPAERT, 1959; DURAND-CHARRE, 2004).

De outro modo, o resfriamento lento permite que o carbono se difunda novamente à medida que a estrutura muda lentamente de CFC para CCC. Por exemplo, um resfriamento em torno de 2 minutos poderia transformar a austenita em perlita e cementita. Perlita é uma estrutura de duas fases, ferrita e cementita, dispostas em lamelas alternadas. Cementita é um carboneto de ferro (Fe_3C), uma estrutura cristalina composta por 6,67% de carbono e 93,3% de ferro por peso, que se caracteriza por ser extremamente dura e quebradiça, enquanto ferrita é ferro puro com estrutura cristalina (CCC) (COLPAERT, 1959). Aqui não foi mencionado o diagrama de transformação - tempo - temperatura (TTT); contudo, nota-se que a taxa de variação da temperatura em função do tempo é a chave para a transformação desejada desses

materiais durante um ciclo térmico ou tratamento térmico. Um procedimento bastante comum é o recozimento, processo capaz de restaurar as características do aço. O recozimento altera as propriedades de um metal realinhando a estrutura do material (grão) usando calor, tornando o metal mais macio e dúctil. Neste processo, o aço é aquecido até pouco acima do seu ponto de recristalização, permitindo que esfrie lentamente. Um recozimento completo envolve deixar o metal esfriar no próprio forno (DURAND-CHARRE, 2004; VALE, 2011).

Um bom exemplo do emprego da taxa de resfriamento pode ser visto no tratamento térmico feito nas famosas espadas japonesas. Após todo o processo de fabricação das lâminas, os japoneses empregam diferentes taxas de resfriamento no processo de têmpera, o que confere, além de beleza, capacidade de manter um fio afiado por mais tempo de serviço e produz a curvatura natural observada nas lâminas. Enquanto o fio consiste em aço de alto carbono (~ 1,0 % de C) para reter o corte, ou seja, maior tenacidade (dureza), o restante da lâmina com menos carbono resulta em maior ductilidade (flexibilidade). Antes do aquecimento, o fabricante de espadas japonês aplica uma mistura secreta de argila que consiste em pó de pedra, cinzas e carvão. A espessura da argila determina a intensidade da taxa de transferência de calor. A argila é aplicada de forma mais fina no fio da lâmina e grossa no dorso. Dessa forma, a têmpera é feita controlando a taxa de resfriamento nas diferentes partes da lâmina. O fio temperado com maior taxa de transferência de calor produz martensita, enquanto o dorso experimenta uma têmpera mais lenta sendo transformado em uma mistura de perlita e ferrita. À medida que a lâmina é temperada, no fio ocorre a transformação da austenita em martensita, o *sori*, ou flexão normal, devido à expansão volumétrica da martensita. A curvatura é estabilizada à medida que a perlita se contrai, devido à contração térmica, contribuindo para uma forte compressão residual ou tensão no fio da lâmina. No dorso, a contração ou flexão reversa é chamada *gyaku-sori*. A linha marcante que surge no metal na interface entre a perlita e a martensita recebe o nome de *hamon*. Após isso é feito o revenimento da lâmina ou *aidori*, em carvão em brasa. Esse domínio do processo de têmpera, praticado desde o século V, mostra a natureza avançada dos metalúrgicos japoneses (MACKENZIE, 2008; INOUE, 2010).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde o início da Idade do Ferro, a temperatura e o mecanismo de têmpera desempenharam papel importante no desenvolvimento da civilização em todo o mundo. Muito do conhecimento inicial de têmpera foi adquirido a partir de misticismo e

experimentação. Foi só muito mais tarde, no início da Era Industrial (1850 d.C.), que a humanidade começou a compreender e quantificar o mecanismo relacionado ao tratamento térmico.

O tratamento térmico controlado do aço é crucial para garantir que ele tenha as propriedades desejadas e necessárias para o uso pretendido, e o aquecimento e resfriamento de diferentes maneiras causam diferentes mudanças estruturais que podem ajustar a estrutura desejada. Embora o carbono tenha sido o primeiro elemento com propriedades de têmpera, outros elementos foram descobertos antes do final do século XIX com a capacidade de melhorar o corte em ferramentas. Em 1868, Müshet, descobriu que a adição de tungstênio (W) tornava o aço mais duro e sem a necessidade de têmpera, trazendo as primeiras inovações às ferramentas de corte.

De fato, a maior limitação dos aços com estrutura martensítica é que eles perdem a dureza devido ao aquecimento causado pelo esforço em temperaturas na faixa de revenido (300 a 600 °C). Convenientemente, foi encontrado que aços com composição aproximada de 2% C, 2,5% Mn e 7% W apresentavam dureza a quente mais elevada. Surgia assim o primeiro aço rápido (HOCKING, 1985). Finalmente, fica evidente que a prática milenar de trabalhos com o aço é consistente com a ciência e as tecnologias modernas e que apenas as experiências antigas baseadas na racionalidade científica foram conservadas, sendo sucessivamente transferidas para o futuro.

REFERÊNCIAS

C. KITTEL. **Introduction to Solid State Physics**. 8th. ed. New York: John Wiley & Sons, NY, 2005.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: John Wiley & Sons, 2002.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 2. ed. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (SP): Edgard Blucher, 1959.

DURAND-CHARRE, M. **Microstructure of Steels and Cast Irons**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004.

HOCKING, M. B. Production of Iron and Steel. Em: **Modern Chemical Technology and Emission Control**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1985. p. 275–299.

INOUE, T. Tantara and the Japanese sword: the science and technology. **Acta Mechanica**, v. 214, n. 1–2, p. 17–30, out. 2010.

MACKENZIE, D. S. History of quenching. **International Heat Treatment and Surface Engineering**, v. 2, n. 2, p. 68–73, jun. 2008.

OHL, B. **What Is the Difference Between FCC and BCC? (Crystal Structure, Properties, Interstitial Sites, and Examples)**. Disponível em: <<https://mstudent.com/what-is-the-difference-between-fcc-and-bcc-crystal-structure-properties-interstitial-sites-and-examples/>>. Acesso em: 12 abr. 2024.

PENSE, A. W. Iron through the ages. **Materials Characterization**, v. 45, n. 4–5, p. 353–363, out. 2000.

SCOTT, D. A. **Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals**. [s.l.] Oxford University Press, 1992.

SLAUGHTER, C.; GOLDENSTEIN, H. A lenda da espada de Damasco - história e tecnologia. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 11, n. 2, p. 155–162, 2014.

TYLECOTE, R. F. **A history of metallurgy**. 2. ed. London: Institute of Materials, 2002.

VALE, A. R. M. **Tratamento Térmico**. [s.l.] Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2011.

WERLTIME, T. A. Man's First Encounters With Metallurgy. **Science**, v. 146, p. 1257–1267, 1964.

WERTIME, T. A. The Beginnings of Metallurgy: A New Look. **Science**, v. 182, n. 4115, p. 875–887, 1973.

Como Referenciar este Artigo, conforme ABNT:

A. S. CARNEIRO. A Ciência da Têmpera do Aço - História e Tecnologia. **Rev. FSA**, Teresina, v. 21, n. 7, art. 9, p. 174-187, jul. 2024.

Contribuição dos Autores	A. S. Carneiro
1) concepção e planejamento.	X
2) análise e interpretação dos dados.	X
3) elaboração do rascunho ou na revisão crítica do conteúdo.	X
4) participação na aprovação da versão final do manuscrito.	X