

O QUE É O AÇO - FUNDAMENTOS

Metalurgista Industrial

maio 2019

www.metalurgistaindustrial.com.br

O aço é indiscutivelmente o material industrial mais importante de nossa sociedade, com um consumo anual que supera 1,5 bilhões de toneladas. Um material inovativo e versátil, que oferece inúmeras possibilidades de desenvolvimento que parecem não ter fim. Os aços podem ser conformados por deformações plásticas em inúmeras formas e podem ser tratados para adquirirem uma vasta gama de propriedades mecânicas que permitem que sejam empregados em uma enorme variedade de aplicações. Todo esse sucesso dos aços deve-se a apenas dois fatores, a presença de carbono em sua metalurgia e a alotropia do ferro.

Aço é uma liga ferro-carbono, usualmente com um ou mais elementos de liga adicionados para a melhoria de suas propriedades, tais como sua resistência às temperaturas ambiente e elevadas, à oxidação e à corrosão. Por definição, aços contêm ao menos 50% de ferro e teor máximo 2% de carbono em peso, que é a quantidade máxima que pode ser dissolvida no ferro CFC a 1.146° C.

Os ferros fundidos contêm mais de 2% de carbono. Os aços podem ser divididos em dois grupos principais: aços-carbono (*plain carbon steels*) e aços-liga (*alloy steels*). Esses últimos podem ser subdivididos de acordo com suas composições químicas como, por exemplo, aços de baixa liga (*low alloy steels*) e aplicação como os aços – ferramenta (*tool steels*).

Os aços-carbono são uma liga de ferro e carbono que também contém manganês e uma variedade de elementos residuais que estavam presentes nas matérias-primas ou foram adicionados com um propósito específico como os desoxidantes alumínio e silício. São chamados de residuais para distingui-los dos elementos de ligas que são deliberadamente adicionados de acordo com teores mínimos especificados, o que é o caso dos aços-liga. Por outro lado, vale ressaltar que pequenas adições de elementos são também realizadas nos aços-carbono como aquelas para controle de inclusões.

O FERRO E SUAS SOLUÇÕES SÓLIDAS

Solutos intersticiais

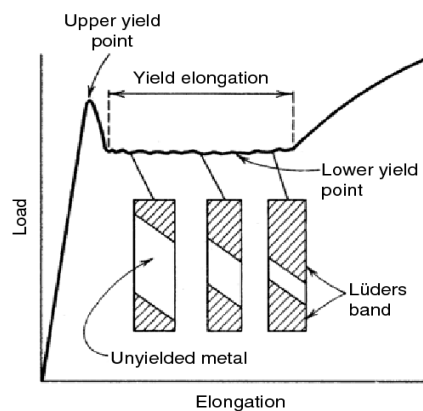
Abaixo de 912° C e sob pressão atmosférica, a estrutura cristalina do ferro é CCC e acima desta temperatura CFC até seu ponto de fusão de 1.538°C. A rede CFC apresenta sítios intersticiais octaédricos, e o raio do maior interstício nesta rede de ferro é de $0,414 \times$ o raio atômico do ferro (140pn) = ~ 58pm, pelo que solutos intersticiais como o carbono (que tem um raio de 70pm) e nitrogênio (65pm) provocam distorção na rede CFC, o que limita suas solubilidades.

A rede CCC, por sua vez, apresenta sítios octaédricos e tetraédricos, mas os primeiros não são simétricos porque dois dos átomos vizinhos estão mais próximos do centro do sítio do que os demais. O raio do maior interstício tetraédrico é de $0,225 \times 140 =$ ~32pm. Como consequência, as solubilidades do C e N são maiores no ferro CFC do que no CCC. A máxima solubilidade do carbono no ferro CCC é de 0,02% em peso. Os demais elementos que encontram solução sólida intersticial no ferro são o hidrogênio e o oxigênio.

As interações entre elementos em solução intersticial e discordâncias são expressivas. Como os solutos C e N são maiores do que os interstícios, estes preferem ocupar

posições ao longo dos núcleos das discordâncias e também aquelas em que os campos de deformação destas contribuem para superar os desajustes de tamanhos entre os solutos e os interstícios. Desse modo, esses solutos encontram-se principalmente segregados em lugares preferenciais, permitindo assim fortes interações. Na transição do regime elástico para o plástico ocorre um serrilhado na curva tensão – deformação, as chamadas bandas de Lüders. Esse fenômeno, ilustrado a seguir, é devido às interações entre os solutos C e N e as discordâncias.

Quando a deformação plástica inicia, as discordâncias encontram-se bloqueadas pelos solutos e uma maior tensão é necessária para seus deslizamentos. Novas discordâncias são geradas e a densidade de discordâncias móveis aumenta. Em testes conduzidos em condições de temperatura favoráveis à maior difusão desses solutos, estes elementos se tornam aptos a se difundirem com suficiente rapidez para “capturarem” discordâncias e bloqueá-las novamente provocando o serrilhado. Essas bandas originam um defeito superficial sob a forma de tiras alongadas nos aços planos de baixo carbono que foram submetidos a recozimento.



Formação de cementita

A solução sólida de carbono no ferro CFC é denominada austenita ou ferro γ (gama), que constitui uma fase não magnética. O ferro CCC é a chamada ferrita ou ferro α (alfa), que constitui uma outra fase. Na transição da austenita CFC para a ferrita CCC sob condições de resfriamento suficientemente lentas para permitir a difusão do carbono, é formada uma outra nova fase denominada cementita. Essa formação é devida à consideravelmente menor solubilidade do carbono na ferrita (0,02%) comparativamente à sua solubilidade na austenita (2%). A cementita é um carbeto de ferro com fórmula Fe_3C com 6,67% de carbono e 93,3% de ferro em peso com uma estrutura cristalina ortorrômbica. É um material cerâmico de elevada dureza e baixa ductilidade. A cementita é uma fase constituinte dos aços termodinamicamente metaestável, sendo convertida em austenita (baixo nível de carbono) e grafite (alto nível de carbono) a temperaturas elevadas. A cementita é estável à temperatura ambiente e não se decompõe. A grafite é a forma estável de equilíbrio do carbono.

A formação da cementita demanda nucleação, algo que não é fácil de ocorrer. Os átomos de carbono movem-se de forma dispersa e alcançam um contorno de grão onde há mais espaço disponível para acomodar esses átomos itinerantes, mesmo de forma eventualmente transitória. A probabilidade, então, de átomos de carbono encontrarem-se em um contorno de grão é maior do que no interior da rede cristalina. Além disso, os átomos de ferro nos contornos de grão são mais aptos a uma ligação ferro-carbono do que no interior da rede, pois não estão tão solidamente ligados a outros átomos de ferro.

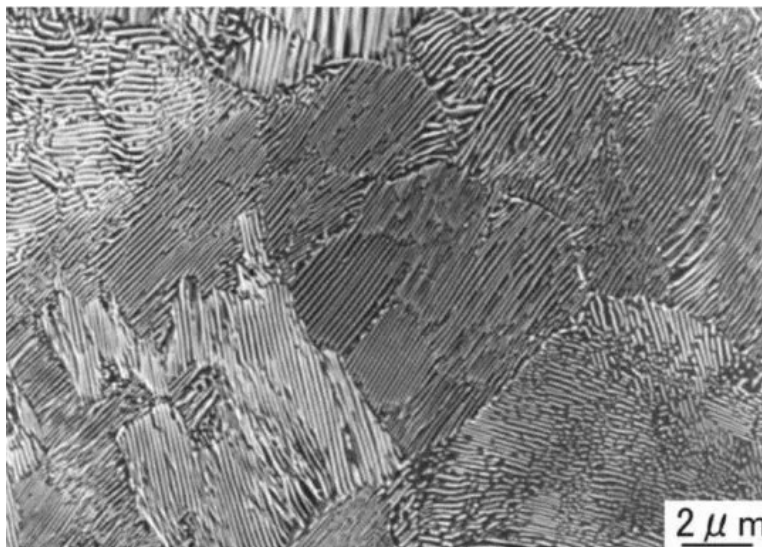
Os contornos de grãos propiciam um ambiente favorável para a nucleação da cementita. Esse tipo de nucleação, que ocorre favorecida por defeitos cristalinos, é chamada de heterogênea em contrapartida à homogênea que ocorre no interior da rede cristalina, esta menos provável de ocorrer nos aços. Assim que um embrião de cementita é formado, este cresce por difusão de átomos de carbono.

A precipitação do carbono da austenita durante o resfriamento lento dos aços forma uma microestrutura lamelar denominada perlita composta de camadas alternadas de ferrita (88% em peso) e cementita (12% em peso). A perlita não é uma fase, mas uma composição de duas fases. A perlita ocorre por uma reação eutetóide à medida que a austenita resfria abaixo de 727°C , a temperatura eutetóide. A composição eutetóide dos aços é $\sim 0,76\%$ de carbono em peso. Aços com teores inferiores a esse valor, os hipoeutetóides, contêm uma proporção correspondente de ferrita que não participa da reação eutetóide e não se transforma em perlita (ferrita proeutetóide).

Os aços com maiores teores de carbono, os hipereutetóides, formarão cementita antes de alcançarem o ponto eutetóide. A ferrita livra-se do excedente de carbono, e para fazê-lo é formado o composto metaestável carbeto de ferro, a cementita. O eutetóide é um divisor das quantidades de carbono. Acima dessa composição, a liga hipereutetóide submetida a resfriamento lento até uma temperatura abaixo da eutetóide formará inicialmente cementita, chamada cementita proeutetóide, um “excesso de cementita” que envolve colônias de perlita.

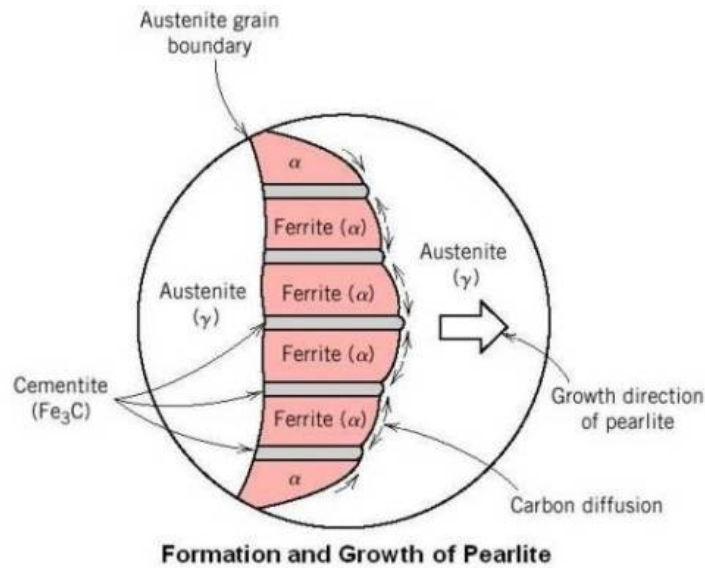
Sob o ponto de vista microscópico, o aço é um material composto metal + cerâmica cuja matriz é a ferrita de elevada ductilidade e a fase dispersa, o reforço, a cementita de elevada dureza.

A figura abaixo mostra uma colônia de perlita em microestrutura lamelar (ferrita clara e cementita escura):



Formação da perlita

A figura a seguir ilustra o mecanismo de formação da perlita a partir dos grãos da austenita. A primeira etapa é a precipitação de átomos de carbono para a formação de lamelas de cementita. Na área imediatamente adjacente a essas lamelas, a matriz de ferro é empobrecida de carbono, e os átomos rearranjam-se para formar a ferrita CCC. São formadas lamelas finas de ferrita em cada lado das lamelas de cementita.



Solutos substitucionais

A maioria dos solutos no ferro ocupa posições substitucionais. O aumento de resistência dos aços por esse mecanismo não é tão efetivo quanto o aumento de resistência intersticial para concentrações similares.

A influência de elementos selecionados na tensão de escoamento da ferrita é mostrada a seguir. Os fortes efeitos dos solutos intersticiais carbono e nitrogênio bem como o do fósforo são evidentes. Os solutos substitucionais silício, cobre, manganês molibdênio, níquel, alumínio e cromo são menos efetivos no aumento da resistência da ferrita.

Embora menos efetivos, elevadas concentrações desses elementos antes citados podem ser dissolvidas, e o aumento de resistência substitucional à temperatura ambiente e acima desta pode ser significativo e de uso na prática. Os meios de controle desse aumento de resistência convergem para ambos os desajustes de tamanhos de átomos e diferenças eletrônicas.

