



Tratamento Térmico

Alan Rafael Menezes do Vale



**Belém - PA
2011**

Presidência da República Federativa do Brasil
Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica

© Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Este caderno foi elaborado em parceria entre o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/IFPA-Belém e a Universidade Federal de Santa Maria para o Sistema Escola Técnica Aberta do Brasil – Rede e-Tec Brasil.

Equipe de Elaboração – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará/IFPA-Belém

Reitor

Edson Ary de O. Fontes/IFPA-Belém

Coordenador Institucional

Erick Alexandre de Oliveira Fontes/IFPA-Belém

Coordenador de Curso

Oscar Jesus Choque Fernandez/IFPA-Belém

Professor-autor

Alan Rafael Menezes do Vale/IFPA-Belém

Equipe Técnica

Carlos Lemos Barboza/IFPA-Belém

Fabiano Darlindo Veloso/IFPA-Belém

Gisely Regina Lima Rebelo/IFPA-Belém

Wyllen Soares Pinheiro/IFPA-Belém

**Comissão de Acompanhamento e Validação
Colégio Técnico Industrial de Santa Maria/CTISM**

Coordenador Institucional

Paulo Roberto Colusso/CTISM

Coordenação Técnica

Iza Neuza Teixeira Bohrer/CTISM

Coordenação de Design

Erika Goellner/CTISM

Revisão Pedagógica

Andressa Rosemárie de Menezes Costa/CTISM

Francine Netto Martins Tadielo/CTISM

Marcia Migliore Freo/CTISM

Revisão Textual

Daiane Siveris/CTISM

Lourdes Maria Grotto de Moura/CTISM

Vera da Silva Oliveira/CTISM

Revisão Técnica

Valdir Bólico Araújo/CTISM

Ilustração

Gustavo Schwendler/CTISM

Diagramação

Leandro Felipe Aguilar Freitas/CTISM

Máuren Fernandes Massia/CTISM

Setor de Processamento Técnico – Biblioteca IFPA – Campus Belém

V149t Vale, Alan Rafael Menezes do.
Tratamento térmico / Alan Rafael Menezes do Vale. — Belém:
IFPA ; Santa Maria : UFSM, 2011.
130p.

1. Tratamento térmico. I. Escola Técnica Aberta do Brasil.
II. Título.

CDD: 671.36

Apresentação e-Tec Brasil

Prezado estudante,

Bem-vindo ao e-Tec Brasil!

Você faz parte de uma rede nacional pública de ensino, a Escola Técnica Aberta do Brasil, instituída pelo Decreto nº 6.301, de 12 de dezembro 2007, com o objetivo de democratizar o acesso ao ensino técnico público, na modalidade a distância. O programa é resultado de uma parceria entre o Ministério da Educação, por meio das Secretarias de Educação a Distância (SEED) e de Educação Profissional e Tecnológica (SETEC), as universidades e escolas técnicas estaduais e federais.

A educação a distância no nosso país, de dimensões continentais e grande diversidade regional e cultural, longe de distanciar, aproxima as pessoas ao garantir acesso à educação de qualidade, e promover o fortalecimento da formação de jovens moradores de regiões distantes dos grandes centros geograficamente ou economicamente.

O e-Tec Brasil leva os cursos técnicos a locais distantes das instituições de ensino e para a periferia das grandes cidades, incentivando os jovens a concluir o ensino médio. Os cursos são ofertados pelas instituições públicas de ensino e o atendimento ao estudante é realizado em escolas-polo integrantes das redes públicas municipais e estaduais.

O Ministério da Educação, as instituições públicas de ensino técnico, seus servidores técnicos e professores acreditam que uma educação profissional qualificada – integradora do ensino médio e educação técnica, – é capaz de promover o cidadão com capacidades para produzir, mas também com autonomia diante das diferentes dimensões da realidade: cultural, social, familiar, esportiva, política e ética.

Nós acreditamos em você!

Desejamos sucesso na sua formação profissional!

Ministério da Educação
Janeiro de 2010

Nosso contato
etecbrasil@mec.gov.br



Indicação de ícones

Os ícones são elementos gráficos utilizados para ampliar as formas de linguagem e facilitar a organização e a leitura hipertextual.



Atenção: indica pontos de maior relevância no texto.



Saiba mais: oferece novas informações que enriquecem o assunto ou “curiosidades” e notícias recentes relacionadas ao tema estudado.



Glossário: indica a definição de um termo, palavra ou expressão utilizada no texto.



Mídias integradas: sempre que se desejar que os estudantes desenvolvam atividades empregando diferentes mídias: vídeos, filmes, jornais, ambiente AVEA e outras.



Atividades de aprendizagem: apresenta atividades em diferentes níveis de aprendizagem para que o estudante possa realizá-las e conferir o seu domínio do tema estudado.



Sumário

Palavra do professor-autor	9
Apresentação da disciplina	11
Projeto instrucional	13
Aula 1 – Introdução ao tratamento térmico	15
1.1 Breve histórico da evolução do tratamento térmico.....	15
1.2 Definição e resultados esperados para os tratamentos térmicos.....	18
Aula 2 – Ligas ferro-carbono	21
2.1 Origem de fabricação.....	21
2.2 Classificação dos aços quanto ao teor de oxigênio	23
2.3 Classificação quanto ao teor de carbono (classificação genérica).....	24
2.4 Classificação quanto ao teor dos elementos de liga	25
2.5 Classificação normativa (ABNT, SAE e AISI).....	26
2.6 Quanto à estrutura cristalina	27
2.7 Interstícios das células unitárias	29
2.8 Defeitos existentes na estrutura cristalina	30
2.9 Estrutura do ferro puro	33
2.10 Dissolução do carbono no ferro	33
2.11 Influência dos elementos de liga	35
Aula 3 – O diagrama de equilíbrio ferro-carbono	41
3.1 Características principais.....	41
3.2 Microestruturas hipoeutetoides, eutetoides e hipereutetoides.....	46
3.3 Ligas eutéicas.....	51
3.4 Zona crítica.....	51
3.5 Zona de austenitização.....	52
3.6 Cálculo do teor dos constituintes do aço (regra da alavanca).....	52
3.7 Fases metaestáveis do aço.....	53
Aula 4 – Curvas em C ou em TTT	59
4.1 Diagramas de transformação isotérmica.....	59

4.2 Diagramas de resfriamento contínuo.....	66
4.3 Fatores que afetam a posição das curvas em C ou em TTT.....	71
Aula 5 – Fatores de influência nos tratamentos térmicos.....	73
5.1 O fator temperatura.....	73
5.2 O fator tempo de tratamento térmico.....	74
5.3 O fator velocidade de resfriamento.....	77
5.4 O fator atmosfera de tratamento térmico.....	79
Aula 6 – Tratamentos térmicos (princípios, características e aplicações).....	83
6.1 Classificação inicial.....	83
6.2 Tratamentos térmicos de recozimento.....	85
6.3 Esferoidização ou coalescimento.....	90
6.4 Normalização.....	92
6.5 Têmpera.....	95
6.6 Revenimento.....	99
6.7 Tratamentos isotérmicos.....	102
Aula 7 – Tratamentos térmicos superficiais.....	107
7.1 Aplicações.....	107
7.2 Têmpera superficial por chama (<i>Flame Hardening</i>).....	108
7.3 Têmpera por indução (<i>Induction Hardening</i>).....	110
7.4 Endurecimento por <i>laser</i> (<i>Laser Beam Hardening</i>).....	111
Aula 8 – Tratamentos termoquímicos.....	115
8.1 Características.....	115
8.1 Cementação.....	116
8.2 Nitretação.....	120
8.3 Carbonitretação.....	123
8.4 Cianetação.....	124
8.5 Boretção.....	124
Aula 9 – Tratamentos térmicos de metais não ferrosos e tratamentos subzero.....	125
9.1 Tratamentos térmicos do cobre e suas ligas.....	125
9.2 Tratamentos subzero.....	126
Referências.....	128
Currículo do professor-autor.....	130

Palavra do professor-autor

Prezados alunos!

A disciplina Tratamento Térmico do Curso de Metalurgia que você está iniciando, pertence ao Ensino a Distância do Brasil (EAD). Esse tipo de ensino é uma ferramenta que possibilita a integração didática e tecnológica na ampliação de conhecimentos gerais e técnicos dos discentes, principalmente daquele contingente que pouco acesso tem aos grandes centros de excelência de ensino técnico no país.

A interação existente nos cursos EAD, proporciona uma relação única de ensino e aprendizagem que atende aos requisitos de qualidade exigidos para uma boa formação técnica dos alunos, fornecendo-lhes também o conhecimento necessário para o ingresso no mercado de trabalho com uma qualificação diferenciada.

Você deve dedicar-se ao estudo do material didático fornecido no módulo pois para que você aprenda o conteúdo são necessários conhecimento, dedicação e interação entre professor e aluno do curso. Com força de vontade e dedicação focalize um objetivo em cada uma das disciplinas deste curso. Assim você será competente para utilizar na sua vida profissional o conhecimento adquirido com o estudo deste módulo.

O estudo dos conceitos e técnicas do Tratamento Térmico da cadeia da Metalurgia ajudará você a ser um aluno com maior conhecimento para aplicar na sua profissão, tornando-o um profissional mais qualificado e requisitado no mercado de trabalho, pois são poucos os que detêm conhecimentos relacionados às alterações nas propriedades físicas e mecânicas de materiais, principalmente na região norte do Brasil.

Prof. Alan Rafael Menezes do Vale, M. Eng.



Apresentação da disciplina

A disciplina Tratamento Térmico, é uma ferramenta que possibilitará a compreensão, ao longo e ao término do curso, dos fundamentos utilizados nas técnicas de aquecimento e resfriamento controlados de materiais, com o intuito de modificar suas propriedades mecânicas.

Essa área da metalurgia possui grande aplicabilidade na indústria metal-mecânica (automobilística, construção civil, engenharia). Contribui também para classificar metais, ligas metálicas e seus respectivos tratamentos térmicos, interpretando diagramas de fases de ligas ferrosas, tornando o aluno apto a reconhecer a ocorrência de mudança de fase em metais.

Ao trabalhar com os diagramas TTT (transformação – tempo – temperatura) você conhecerá o seu comportamento. Será capaz de realizar tratamentos térmicos de aços através do recozimento, normalização, têmpera e revenimento, conhecendo suas características e aplicações práticas.

Serão estudados os tratamentos isotérmicos aplicados em aços do tipo martêmpera e austêmpera, distinguindo suas particularidades e aplicações industriais. Conhecerá as propriedades de endurecibilidade ou temperabilidade e suas aplicações práticas. Distinguirá, os tratamentos termoquímicos de nitretação e cementação, conhecendo aplicações e características principais.

Poderá executar tratamentos termoquímicos de cianetação, boretação e carbonitretação em aços, analisando suas características e aplicações práticas e efetuar tratamentos térmicos a serem aplicados em metais não ferrosos como cobre, por exemplo, conhecendo suas qualidades e aproveitamentos.

Você será capaz também de desenvolver projetos de instalação e produção de ensaios térmicos de produtos metalúrgicos, aplicar processos térmicos e termoquímicos de metais ferrosos e não ferrosos e analisar e interpretar técnicas de tratamento térmico de produtos metálicos ferrosos e não ferrosos, visando à melhoria da qualidade industrial.



Projeto instrucional

Disciplina: Tratamento Térmico (carga horária: 50h).

Ementa: Introdução ao tratamento térmico. Ligas ferro-carbono. O diagrama de equilíbrio ferro-carbono. Curvas em C ou em TTT. Fatores de influência nos tratamentos térmicos. Tratamentos térmicos (princípios, características e aplicações). Tratamentos térmicos superficiais. Tratamentos termoquímicos. Tratamentos térmicos de metais não ferrosos e tratamentos subzero.

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
1. Introdução ao tratamento térmico	Descrever o histórico e a evolução do tratamento térmico. Trabalhar com os conceitos iniciais do tratamento térmico de ligas metálicas.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: listas de exercícios.	02
2. Ligas ferro-carbono	Descrever a origem, características e classificação das ligas ferro-carbono.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: listas de exercícios.	06
3. O diagrama de equilíbrio ferro-carbono	Interpretar e classificar os diagramas de fases de ligas ferrosas. Reconhecer as características das transformações termicamente induzidas a uma mesma faixa de temperatura, ou seja, a ocorrência de mudança de fase.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: listas de exercícios.	06
4. Curvas em C ou em TTT	Trabalhar com os diagramas TTT (Transformação – Tempo – Temperatura) conhecendo o seu comportamento. Identificar os fatores que afetam a posição das curvas em C ou em TTT.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: listas de exercícios.	06
5. Fatores de influência nos tratamentos térmicos	Descrever as características dos fatores que influenciam no comportamento dos tratamentos térmicos.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: listas de exercícios.	04

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
6. Tratamentos térmicos (princípios, características e aplicações)	Apresentar os princípios dos tratamentos térmicos de recozimento, normalização, têmpera e revenimento, identificando suas características e aplicações práticas. Conhecer os tratamentos térmicos de aços com processos isotérmicos do tipo martêmpera e austêmpera, distinguindo suas particularidades e aplicações industriais. Descrever as propriedades de endurecimento ou temperabilidade e suas aplicações práticas.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: listas de exercícios.	14
7. Tratamentos térmicos superficiais	Conhecer os tratamentos térmicos aplicados na superfície de metais, suas aplicações e principais características.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: listas de exercícios.	04
8. Tratamentos termoquímicos	Conhecer os tratamentos termoquímicos de nitretação e cementação, suas aplicações cotidianas e características. Descrever os princípios dos tratamentos termoquímicos de cianetação, boretação e carbonitretação em aços, analisando suas características e aplicações práticas.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: listas de exercícios.	04
9. Tratamentos térmicos de metais não ferrosos e tratamentos subzero	Descrever os tratamentos térmicos a serem aplicados em metais não ferrosos, como o cobre, identificando suas qualidades e aproveitamento. Caracterizar os tratamentos térmicos a serem aplicados em metais a temperaturas abaixo de zero grau Celsius.	Ambiente virtual: plataforma <i>moodle</i> . Apostila didática. Recursos de apoio: listas de exercícios.	02

Aula 1 – Introdução ao tratamento térmico

Objetivos

Descrever o histórico e a evolução do tratamento térmico.

Trabalhar com os conceitos iniciais do tratamento térmico de ligas metálicas.

1.1 Breve histórico da evolução do tratamento térmico

A humanidade há milhares de anos (aproximadamente 1000 a.C.), descobriu os metais e as aplicações destes em seu cotidiano. Em seguimento, aprendeu que, com aquecimento e resfriamento desses metais, podia modificar suas propriedades mecânicas e metalúrgicas, tornando-os mais duros, trabalháveis, moles, resistentes, frágeis, dentre outras características.

Cerca de 350 a.C. surge na Índia, e ainda antes na China, o ferro de fusão: ferro extraído do minério por meio de fornos cujo funcionamento era semelhante ao dos atuais altos-fornos. Um bloco esponjoso obtido era martelado para libertar as escórias, sendo depois refundido em pequenos cadinhos que se deixavam arrefecer lentamente. Os aços de Damasco eram já verdadeiros compósitos formados de camadas alternadas de aço duro e aço macio ligados entre si por solda e forjamento.

Posteriormente, o homem descobriu o aço, liga de ferro e carbono, e dela conseguiu obter características diferenciadas, como a elevada dureza, através do aumento da velocidade de resfriamento das ligas ou trabalhando com aços de teores de carbono mais elevados. Concluiu assim que esses dois fatores são decisivos nas modificações das propriedades dos aços.

É antiga a preocupação do homem em possuir metais de elevada resistência e qualidade. Em guerras medievais, 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.

Em Roma, antes de Cristo, Júlio César desfrutava de vantagem do seu arsenal bélico sobre os demais, pois os romanos já haviam descoberto o aumento da dureza do ferro, quando ele era aquecido durante longo tempo num leito de carvão vegetal e resfriado, em seguida, em salmoura. Esse procedimento está relacionado às conquistas romanas em trechos onde havia água do mar que, naturalmente é salobra, sendo considerada a primeira forma de tratamento térmico conhecida, pois permitia a fabricação de armas mais duras e mais resistentes.

Na Idade Média fabricava-se de novo o aço aquecendo-se o ferro em contato direto com materiais ricos em carbono. O enriquecimento em carbono tinha como lugar unicamente a superfície. Para se obterem materiais duros, com certo volume, forjava-se em conjunto uma grande quantidade de pequenas peças de aço enriquecido em carbono.

Todavia o homem necessitou de muitas gerações para lidar de maneira mais eficaz com o calor e com os processos e meios de resfriamento dos metais, para realizar um tratamento térmico melhorado.

Apenas no século XVIII (1740) Huntsman redescobriu a fusão do aço. Fundindo em um cadinho pequenos pedaços de ferro enriquecido em carbono, obteve um bloco de aço homogêneo e que endurecia de maneira uniforme.

No início do século XIX surgiu a elaboração, por mistura em cadinho, antes da fusão, de ferro e materiais ricos em carbono e, mais tarde, de gusa. Contudo, apenas em 1820 é que Karsten mostrou que a diferença entre ferro, aço e gusa (ferro fundido) consistia no teor em carbono.

Em 1868 Mushet descobriu que a adição de tungstênio ao aço tornava-o mais duro após aquecimento sem que houvesse necessidade de temperá-lo. Logo se reconheceu que esse aço resistia a mais desgaste e que, no caso das ferramentas de corte, mantinha a afiação, mesmo depois de tempos de serviço mais longos.

Foi, entretanto, vinte e cinco anos depois que se constatou que esse aço (com composição aproximada de 2% C, 2,5% Mn e 7% W) tinha dureza a quente muito mais elevada e que suportava aumentos consideráveis das velocidades de corte. Surgia assim o primeiro aço rápido.

Em 1878, Holtzer teve a ideia da adição de cromo ao aço, mas os tratamentos térmicos ainda não estavam totalmente compreendidos. Achava ele que esse

aço não suportaria aquecimentos acima de 900°C. Com as experiências de Taylor no final do século XIX, descobriu-se que o aço, com teores de cromo melhorava suas propriedades a altas temperaturas, de tal modo que suas características lhe permitiam ter velocidades de corte muito elevadas para a época (10 metros a cada minuto).

Taylor e White, em meados do século XIX, idealizaram um aço com 1,85% C, 4% Cr e 8% W, seguindo-se de uma queda do teor de carbono para 0,7%, acompanhada de um aumento do teor em tungstênio para 14%. Criou-se, então, a base dos aços rápidos dos dias de hoje.

No século XX, progrediu-se no campo dos aços rápidos e este crescimento estendeu-se aos aços-ferramenta. Em 1920, já existiam 12 variedades disponíveis nos Estados Unidos, e a maior parte deles continua a ser fabricada atualmente. É o caso dos aços que trabalham a quente que contém cromo ou tungstênio, e os aços de trabalho a frio que contém manganês, tungstênio, cromo e vanádio.

Em aços rápidos, a dureza a quente aumentou grandemente com a adição de cobalto em teores que podem ir até cerca de 10%.

Dentre as importantes melhorias por parte da composição química após a Primeira Guerra Mundial, é de se salientar a introdução de molibdênio nos aços com 5% de cromo para sanar problemas de temperabilidade e aparecimento dos aços grafiticos e dos aços com endurecimento estrutural para melhorar sua usinabilidade.

Durante esse período, verifica-se a utilização mais intensa de molibdênio em substituição ao tungstênio nos aços rápidos. Essa tendência acentuou-se durante a Segunda Guerra Mundial pelas dificuldades de obtenção de tungstênio. A utilização de banhos de sais nos tratamentos térmicos alcançou grandes progressos.

Após 1950, a evolução dos aços-ferramenta situou-se, principalmente nas condições de elaboração e de transformação para refinar a estrutura dos aços obtidos. No início dos anos de 1970, já existiam duzentas e quarenta e cinco variedades de aços-ferramenta no trio formado por Estados Unidos, Alemanha e França.

A contínua evolução e aplicabilidade da mecanização e a diversidade dos meios empregados para transformar os diferentes materiais elevaram o campo

de utilização dos aços-ferramenta, levando fabricantes de ligas a dotá-las de várias qualidades para atender às necessidades da indústria. Essa diversificação se deve ao fato de o aço-ferramenta ser aplicado em diversas possibilidades: das ferramentas manuais, passando por ferramentas de trabalho a quente, até ferramentas de corte.

1.2 Definição e resultados esperados para os tratamentos térmicos

Tratamento térmico é o processo de aquecimento e resfriamento, em condições controladas de ligas metálicas, ferrosas e não ferrosas, onde se objetiva modificar as suas propriedades. Dessa forma obtém-se uma variedade de propriedades que permitem que as ligas sejam adequadas a diversas aplicações, conseguindo-se tais efeitos com reduzidos gastos financeiros.

Na engenharia, os aços e ligas são mais frequentemente utilizados, o que define o foco deste curso sobre esses materiais. Contudo, os tratamentos térmicos estudados nesta apostila têm aplicações práticas a outros tipos de ligas ferrosas e não ferrosas. O tratamento térmico pode ser executado basicamente, a partir de três fases principais:

- a) Aquecimento.
- b) Manutenção da temperatura.
- c) Resfriamento.

O tratamento térmico imprime as seguintes características aos materiais que passam por esse tipo de processo:

- Remoção de tensões internas.
- Aumento ou diminuição da dureza.
- Aumento da resistência mecânica.
- Melhoria da ductilidade.
- Melhoria da usinabilidade.

- Melhoria da resistência ao desgaste.
- Melhoria da resistência à corrosão.
- Melhoria da resistência ao calor.
- Melhoria das propriedades elétricas e magnéticas.

Resumo

Nesta aula, estudou-se a evolução histórica do tratamento térmico de materiais, o que acaba por se confundir com a descoberta e a melhoria na manufatura de metais comumente empregados hoje em dia.

Procedimentos, como a produção do aço e de ligas metálicas têm relação estreita com o desenvolvimento dos tratamentos térmicos desses materiais. Apresentam-se também o progresso de técnicas empregadas atualmente nos tratamentos térmicos, a definição de tratamento térmico, suas três principais fases e os resultados esperados para materiais que passam por esse tipo de processo.

Atividades de aprendizagem

As atividades que você realizará ocorrerão no decorrer dos estudos e serão fundamentais em seu processo de aprendizagem e avaliação. Discuta através do ambiente virtual de aprendizado com o seu tutor a evolução do tratamento térmico e sua definição e resultados práticos.



Agora, depois de esclarecer dúvidas com o seu tutor, você está preparado para realizar a primeira atividade. Em sequência, será corrigido o exercício que somará como conteúdo, para a realização da primeira avaliação. Vamos a ele!

1. Defina tratamento térmico.
2. Cite algumas aplicações do tratamento térmico dos metais no decorrer das eras da humanidade.
3. Cite as três principais fases de um tratamento térmico.
4. Diga quais características são esperadas para materiais que passam por processos de tratamento térmico.

Aula 2 – Ligas ferro-carbono

Objetivos

Descrever a origem, características e classificação das ligas ferro-carbono.

2.1 Origem de fabricação

Os metais provêm dos depósitos naturais de minérios na crosta terrestre.

A maioria dos minérios é contaminada com impurezas que devem ser removidas por meios mecânicos ou químicos.

O metal extraído do minério purificado é conhecido como metal primário ou metal virgem, e o metal proveniente da ganga (parte não aproveitável da massa de uma jazida mineral) é designado metal secundário.

Há dois tipos de minérios, os ferrosos e os não ferrosos. O termo ferroso provém do latim *ferrum*, significando ferro.

Um metal ferroso é aquele que possui alto teor de ferro. Metais não ferrosos como o cobre e o alumínio, por exemplo, são aqueles que contêm pouco ou nenhum ferro.

A quantidade de ferro na crosta terrestre é de aproximadamente vinte vezes a de todos os outros metais não ferrosos juntos; por isso o ferro é o metal mais importante e o mais empregado.

O alumínio, por causa de sua aparência atraente, resistência relativamente alta e baixa densidade, é o segundo metal mais usado.

O minério de alumínio comercialmente explorável, conhecido como bauxita, é um depósito formado próximo à superfície da crosta terrestre.

Alguns dos processos químicos que ocorrem durante a fabricação do aço, ocorrem também durante a soldagem, de modo que a metalurgia da solda-

gem pode ser vislumbrada, imaginando-se a soldagem ao arco elétrico como a miniatura de uma siderúrgica.

As ligas ferro-carbono caracterizam-se por possuírem diversas variantes em função do teor de carbono, dos elementos de liga adicionados e seus respectivos percentuais; em função de seu processamento, de sua microestrutura, de sua aplicação e do teor de oxigênio. A Figura 2.1, mostra o ciclo de produção do aço.

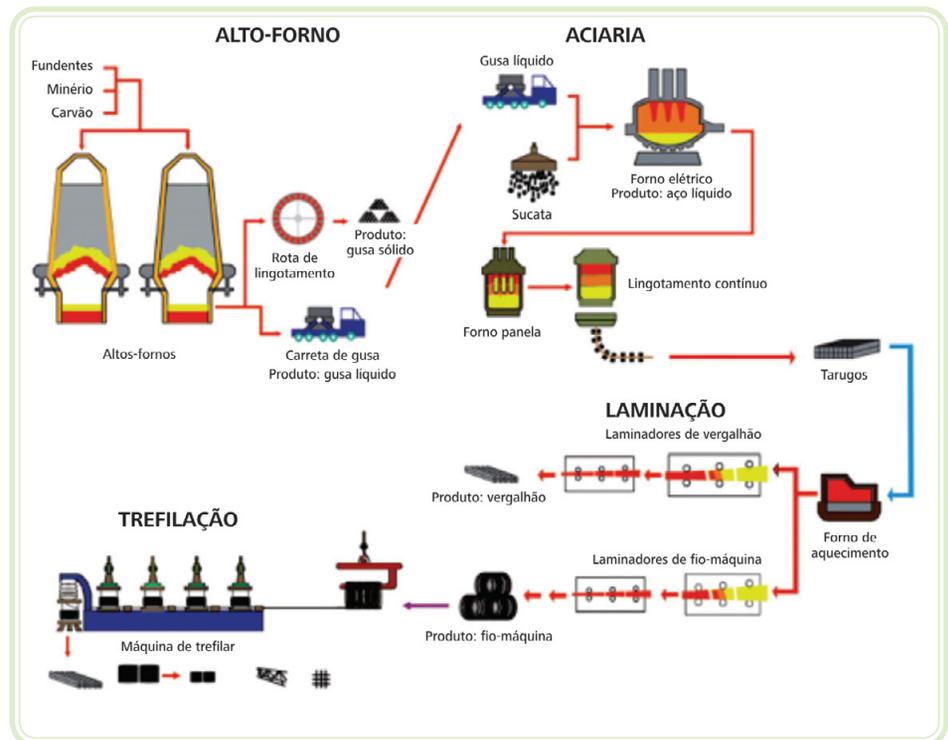


Figura 2.1: Ciclo de produção do aço

Fonte: Adaptado de <http://www.sinobras.com.br/index2.php?p=siderurgia.php>

A atividade básica do alto-forno é reduzir o óxido de ferro para ferro metálico e remover as impurezas do metal.

O metal proveniente do alto-forno é denominado ferro-gusa e é empregado como um material intermediário para posteriores processos de refino.

O ferro-gusa contém quantidades excessivas de elementos que devem ser reduzidos antes que o aço seja produzido, conforme se demonstra na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Composição do ferro-gusa

Elemento	Teor (%)
Carbono (C)	3,00 a 4,50
Silício (Si)	0,50 a 3,00
Manganês (Mn)	1,00 a 2,00
Fósforo (P)	0,04 a 0,40
Enxofre (S)	0,035 a 0,050

Fonte: Moreira, 2004

Reduzir o ferro significa que ele receberá elétrons: o ferro passa de Fe^{++} ou Fe^{+++} para Fe° , onde cada átomo de ferro recebe dois ou três elétrons.

Para o refino do aço são empregados diversos tipos de fornos, dentre estes, os elétricos, cada um realizando sua tarefa de remoção e redução de elementos como carbono, silício, fósforo, enxofre e nitrogênio.

Depois de passar pelo forno de refino, o metal constituído de aço saturado de oxigênio é purificado em lingoteiras feitas de ferro fundido.

A fim de evitar a formação de bolsas de gases no metal fundido, uma quantidade considerável de oxigênio deve ser removida. Esse processo é conhecido como desoxidação e é realizado através de aditivos que expulsam o oxigênio na forma de gases ou enviam-no em direção à escória.

Existem diversos graus de oxidação descritos no item a seguir.

2.2 Classificação dos aços quanto ao teor de oxigênio

2.2.1 Aços efervescentes

São aços que possuem uma desoxidação mínima, tendo uma camada de ferro quase puro nas paredes do lingote.

Sua superfície é livre de defeitos e pode ser produzida com a ajuda da camada de ferro quase puro.

A maioria dos aços efervescentes é constituída de aços de baixo carbono, contendo menos de 0,1% desse elemento.

2.2.2 Aços parcialmente desoxidados

São ligas de ferro-carbono que possuem quantidade regulada de oxigênio. Possuem composição mais homogênea, bom acabamento superficial e propriedades mecânicas superiores às dos aços efervescentes.

2.2.3 Aços acalmados

Os aços acalmados são aqueles que possuem quantidade nula de oxigênio. Para se remover o oxigênio, adicionam-se ligas de ferro silício que combinam com o oxigênio (escória), resultando em um metal mais homogêneo.

2.2.4 Aços parcialmente acalmados

São intermediários aos aços efervescentes e acalmados.

Neles, é adicionada uma pequena quantidade de agente desoxidante (ferro silício ou alumínio).

A quantidade de desoxidante é a estritamente suficiente para cortar qualquer reação de efervescência, deixando algum oxigênio dissolvido.

2.2.5 Aços desoxidados a vácuo

Remove-se o oxigênio do aço fundido sem adicionar elementos que formem inclusões não metálicas. Isso é realizado aumentando-se o teor de carbono do aço e submetendo o metal fundido à desgaseificação a vácuo. O carbono reage com o oxigênio e forma monóxido de carbono. Os níveis de oxigênio e de carbono caem para os limites especificados.

Como não são usados elementos desoxidantes formadores de óxidos sólidos, o aço produzido por esse processo possui alta pureza.

A seguir os aços serão classificados em função do teor de carbono.

2.3 Classificação quanto ao teor de carbono (classificação genérica)

São classificados em quatro grupos, dependendo de seus níveis de carbono. Os aços possuem níveis de resistência e de dureza elevados através da adição desse elemento.

Baixo carbono – até 0,14% de carbono.

Aço doce – de 0,15% até 0,29% de carbono.

Aço de médio carbono – de 0,30% até 0,59% de carbono.

Aço de alto carbono – de 0,60% até 2,00% de carbono.

Ferro fundido – acima de 2,00% de carbono.

Os aços de baixo carbono e doce são os mais produzidos por sua relativa resistência e boa soldabilidade.

2.4 Classificação quanto ao teor dos elementos de liga

2.4.1 Aços de baixa-liga

Contêm pequenas quantidades de elementos de liga. O teor desses elementos varia de 1,5 a 5% do total. Os elementos de liga mais comuns são o manganês, silício, cromo, níquel, molibdênio e vanádio.

Aços de baixa-liga podem conter quatro ou cinco desses elementos de liga em diversos teores.

Esses aços têm melhores limites de resistência mecânica e escoamento em várias faixas de temperatura, quando comparados aos aços carbonos comuns, possuindo também melhor razão resistência/peso do que os aços carbono comuns, o que resulta em equipamentos mais leves.

2.4.2 Aços de média-liga

Nesses aços, o teor dos elementos de liga varia de 5 a 10% do total. Podem apresentar características semelhantes às dos aços de baixa-liga, requerendo, contudo, maiores cuidados em sua fabricação e soldagem.

2.4.3 Aços de alta-liga

Nesses, o teor dos elementos de liga ultrapassa os 10%, tendo, em função desses elevados índices, elevado preço e propriedades mecânicas excepcionais. São aplicados a finalidades específicas e requerem cuidados especiais na soldagem desses materiais.

Aços inoxidáveis são aços de alta-liga que possuem a capacidade de resistir à corrosão. Essa característica provém do alto teor de cromo (acima de 10%). O níquel também é empregado em quantidades consideráveis em alguns aços inoxidáveis.

Aços-ferramentas também são exemplos de aços de alta-liga.

2.5 Classificação normativa (ABNT, SAE e ANSI)

As classificações normativas são ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), SAE (*Society of Automotive Engineers*) e AISI (*American Iron and Steel Institute*).

A classificação normativa condensada dos aços é mostrada na Figura 2.2. A normatização é compreendida por quatro ou até mesmo cinco algarismos (XXXXX) os dois últimos à direita correspondem ao teor de carbono, em %, multiplicados por 100. Por exemplo, um aço AISI 1020 é um aço carbono comum, com 0,2% de carbono em sua composição, ou seja, 0,2% vezes 100, que resulta no número 20, que é o código (dois últimos algarismos) que irá compor a nomenclatura para este aço.

Outro exemplo seria o aço 1330, que é um aço carbono, com alto teor de manganês e 0,3% de carbono em sua composição, ou seja, 0,3% vezes 100, que resulta no número 30, que é o código (dois últimos algarismos) que irá compor a nomenclatura para este aço.

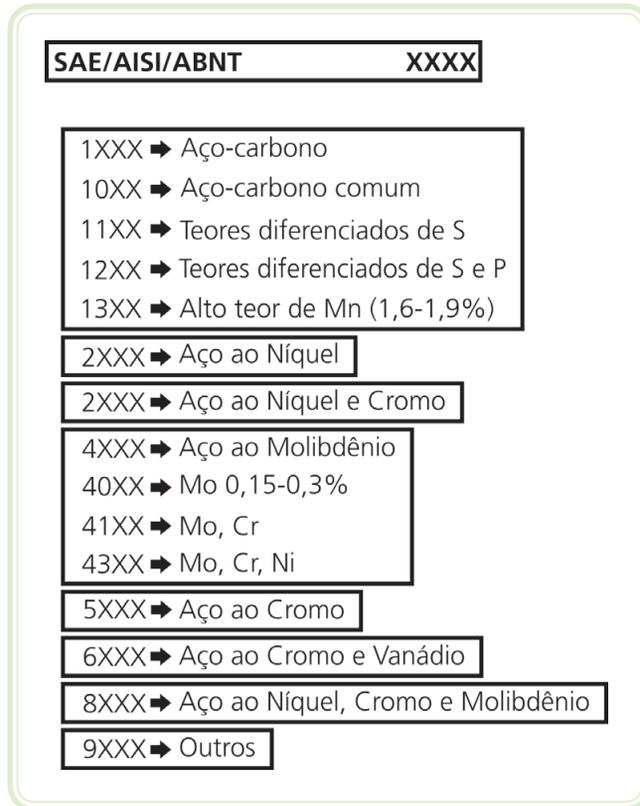


Figura 2.2: Classificação normativa dos aços

Fonte: Costa, 2003

2.6 Quanto à estrutura cristalina

2.6.1 Quanto à estrutura em retículos cristalinos

As ligas ferrosas e não ferrosas formam-se em estruturas cristalinas. Tais estruturas constituem-se de uma rede de pontos que se prolonga nas três direções do espaço, como se demonstra na Figura 2.3.

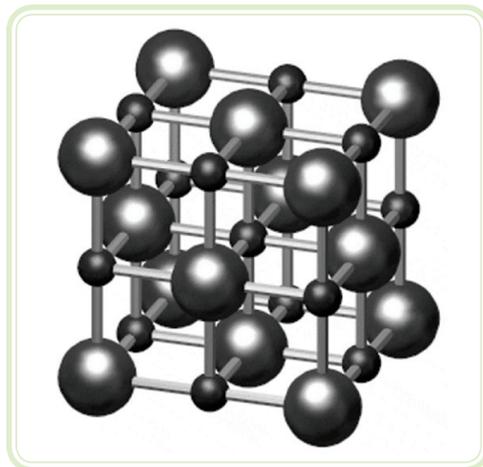


Figura 2.3: Representação de uma rede cristalina

Fonte: <http://www.las.inpe.br/~cesar/Infrared/gifsemic/pbtecell.gif>

Muitas ligas possuem uma distribuição característica e regular dos seus átomos sendo chamadas então de materiais cristalinos.

A partir desta regularidade, podem-se representar, então, todos os átomos de uma liga metálica através de um conjunto que define sua distribuição espacial. A esta mínima porção do reticulado cristalino, chama-se **célula unitária**.

As células unitárias interessantes ao estudo dos tratamentos térmicos de ligas metálicas são o sistema cúbico e o sistema tetragonal.

Na Figura 2.4 são mostradas as células unitárias das estruturas cúbicas de corpo centrado (CCC), cúbica de faces centradas (CFC) e tetragonal de corpo centrado (TCC). A disposição dos átomos na célula unitária pode ser feita através de esferas perfeitas ou a partir de sua representação esquemática.

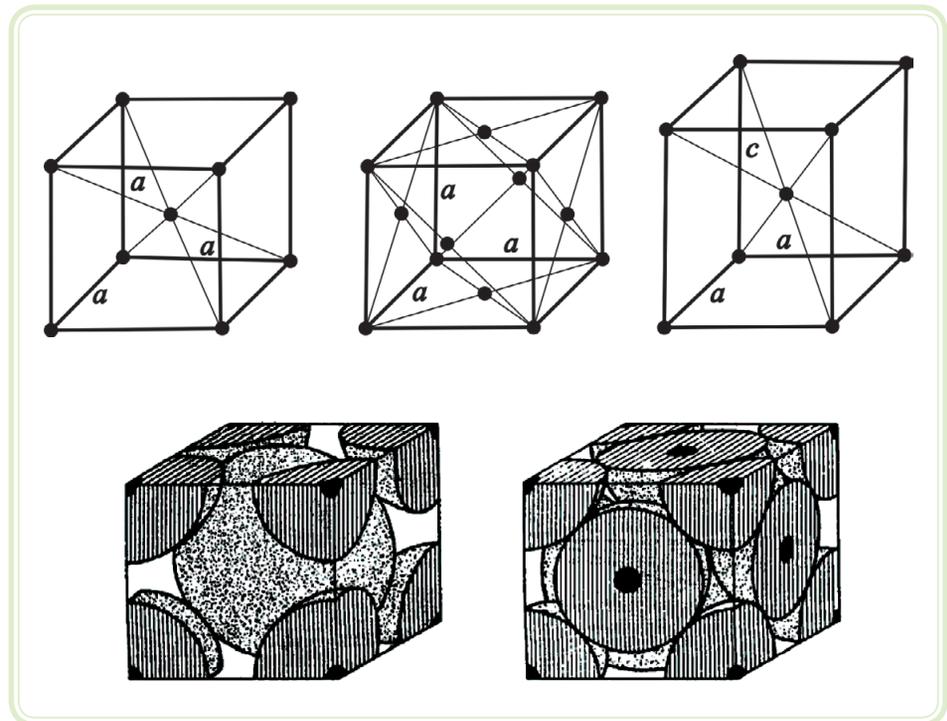


Figura 2.4: Representação esquemática das células unitárias das estruturas CCC, CFC e TCC e abaixo modelo de esferas das estruturas CCC e CFC

Fonte: Adaptado de Guy, 1994 apud Strohaecker, 2003

Na Figura 2.4, "a" e "c" são os parâmetros geométricos da célula unitária que definem sua estrutura geométrica.

2.6.2 Estrutura cúbica de corpo centrado (CCC)

A estrutura CCC é caracterizada pela figura de um cubo. Além disso, os átomos localizam-se nos vértices e no centro da célula unitária. Deve-se observar que os átomos dos vértices têm apenas um oitavo do seu volume, ocupando espaço na célula unitária, que é uma célula com baixa densidade e tem baixo fator de empacotamento, o qual indica a eficácia de utilização do espaço livre em uma célula unitária.

2.6.3 Estrutura cúbica de faces centradas (CFC)

A estrutura CFC possui os mesmos parâmetros geométricos que a estrutura CCC, porém a distribuição dos átomos muda. Eles se localizam nos vértices e no centro de cada uma das faces do cubo, fazendo com que os átomos das faces tenham metade do seu volume e ocupando espaço na célula unitária.

Comparando-se o fator de empacotamento das duas estruturas, conclui-se que a estrutura CFC é mais compacta do que a estrutura CCC, ou seja, seus átomos ocupam de maneira mais eficaz o espaço. Se o mesmo raio atômico for adotado, os átomos organizados segundo uma estrutura CFC ocuparão um menor volume, o que levará a célula a uma maior densidade.

2.7 Interstícios das células unitárias

Nas estruturas cristalinas, o fator de empacotamento é sempre menor do que um (1), ou seja, os átomos não ocupam todo o espaço disponível na célula unitária. Isso implica a existência de espaços vazios entre os átomos da estrutura. Essas lacunas são chamadas de **interstícios** e são importantes nos tratamentos térmicos dos aços.

Em geral há vários interstícios em uma estrutura cristalina e, quanto menor o fator de empacotamento, maior é o volume destinado aos interstícios. Mesmo assim, uma estrutura CFC possui interstícios maiores do que uma estrutura CCC, conquanto o seu fator de empacotamento seja maior.

No caso da liga ferro-carbono, a estrutura que possuir os maiores interstícios terá maior solubilidade do que aquela na qual houver interstícios menores. Na Figura 2.5 apresentam-se os interstícios das células CCC e CFC.

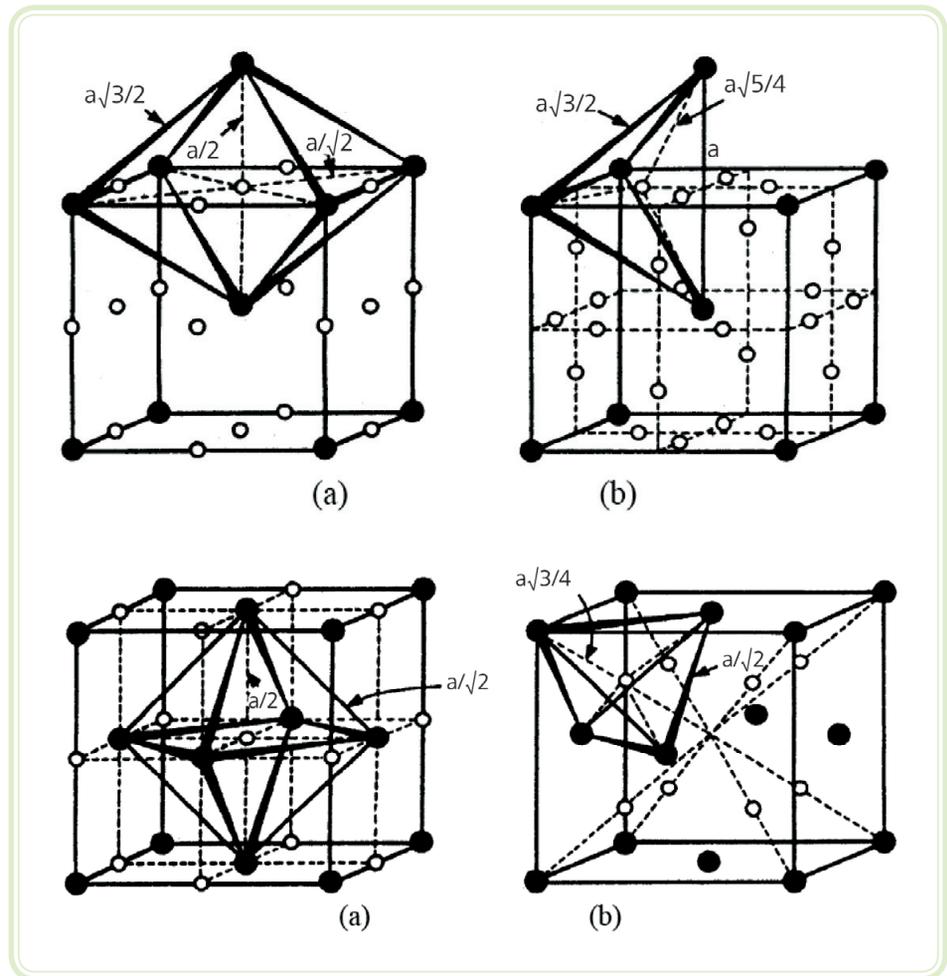


Figura 2.5: Interstícios octaédricos (a) e interstícios tetraédricos (b) em uma estrutura CCC (acima) e uma estrutura CFC (abaixo)

Fonte: Adaptado de Leslie, 1982 apud Strohaecker, 2003

Define-se um interstício pela figura poliédrica formada pelos átomos que estão no entorno do espaço vazio e, desta forma, encontram-se interstícios tetraédricos e octaédricos. A estrutura CCC e a estrutura CFC possuem esses interstícios, porém eles são maiores na célula CFC.

2.8 Defeitos existentes na estrutura cristalina

Uma estrutura cristalina real nem sempre obedece a uma rede que se distribui regularmente pelo espaço com átomos nela constituídos e também distribuídos de forma igualitária. Uma rede cristalina possui defeitos os quais podem influenciar em suas propriedades. A seguir são relacionados alguns defeitos usuais e como eles se configuram em uma rede cristalina.

2.8.1 Lacunas

Caracterizam-se pela ausência de um átomo em um vértice da estrutura cristalina, o que ocasiona uma ligação deficitária entre os átomos, fazendo com que os mesmos acabem por se aproximar, provocando distorções na rede e de energia naquele ponto. Na Figura 2.6 esse defeito é ilustrado.

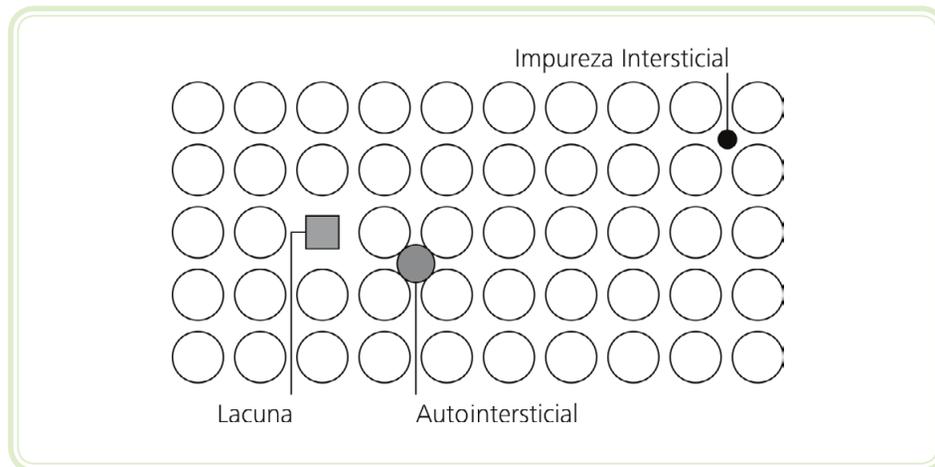


Figura 2.6: Defeitos do tipo lacuna, autointersticial e de impureza intersticial

Fonte: Guy, 1994 apud Strohaecker, 2003

2.8.2 Defeitos intersticiais

São caracterizados pela presença de um átomo em um dos interstícios da rede cristalina. Quando o átomo é do mesmo elemento que forma a estrutura, chama-se de autointersticial. Contudo, quando o átomo é estranho à rede, denomina-se o defeito de impureza intersticial. A energia acumulada e a distorção da rede são muito maiores do que em uma lacuna. A Figura 2.6 apresenta esse defeito.

2.8.3 Discordâncias

É o defeito em um plano da rede cristalina, envolvendo o posicionamento de uma cadeia de átomos. A discordância em cunha é um exemplo típico desse defeito. Ela pode ser considerada como um plano adicional de átomos, gerando um efeito de cunha na rede. Essa discordância é mostrada na Figura 2.7. Como a discordância em cunha abrange um número maior de átomos, acaba então por alcançar um nível muito maior de energia do que um defeito de lacuna ou intersticial.

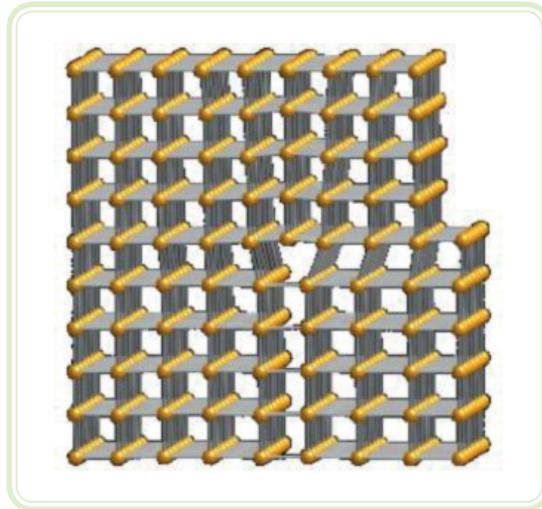


Figura 2.7: Discordância em cunha

Fonte: Adaptado de Guy, 1978 apud Callister, 2002

A deformação plástica de uma liga sofre grande influência das discordâncias existentes em sua rede cristalina, tendo em vista que elas permitirão o escorregamento de planos cristalinos sob tensão, produzindo as deformações.

Estando livres as discordâncias para se movimentarem pelo reticulado cristalino, a deformação facilmente ocorrerá. Todavia, se houver defeitos intersticiais, tais movimentos serão mais restritos, dificultando a deformação, o que implicará consequente aumento do limite de escoamento da liga metálica.

2.8.4 Contorno de grão

Levando-se novamente em conta uma liga metálica real, a estrutura cristalina não possuirá uma única orientação, estando subdividida em um grande número de zonas, cada uma delas com uma orientação diferente, formando cristais autônomos. Denominam-se esses cristais que têm uma orientação independente de **grãos**.

Uma estrutura cristalina possui todos os grãos de uma fase do material, diferenciando-se a orientação entre cada um dos grãos vizinhos. Como resultado dessa diferença na organização espacial da granulação surge uma zona de transição entre as orientações, fazendo com que os átomos desta parte fronteira fiquem desalinhados e com elevados níveis energéticos. Chama-se essa região de fronteira de **contorno de grão**. A acomodação dos átomos no interior dos grãos é ilustrada na Figura 2.8.

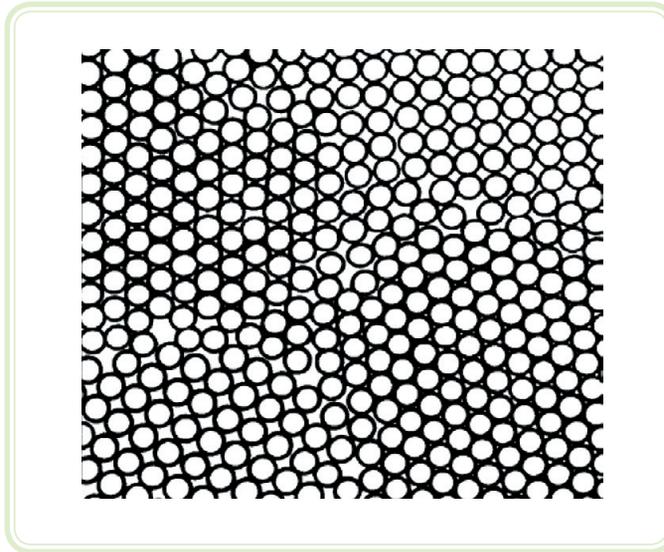


Figura 2.8: Distribuição atômica na estrutura cristalina de uma liga metálica
Fonte: Van Vlack, 1984

2.9 Estrutura do ferro puro

2.9.1 Alotropia

É a propriedade que alguns materiais possuem de modificar sua estrutura cristalina em função da temperatura, mantendo-se a pressão constante, na qual forem expostos. O ferro puro possui essa característica, podendo haver uma orientação de seus átomos em uma estrutura CCC ou CFC.

Da temperatura ambiente (25°C) até 912°C, o ferro possui uma estrutura CCC, e nessa situação é denominado ferro α . No intervalo compreendido entre 912°C e 1394°C apresenta estrutura CFC e é chamado de ferro γ . Já na zona correspondente ao intervalo de 1394°C até o ponto de fusão (1536°C) apresenta novamente estrutura CCC, sendo nomeado ferro δ .

Tais alterações na estrutura cristalina do ferro produzem implicações nas transformações do ferro puro e nas ligas à base deste elemento.

2.10 Dissolução do carbono no ferro

Os mais importantes empregos das transformações de fase do ferro encontram-se nas ligas ferro-carbono. O carbono forma uma solução sólida intersticial com o ferro, isto é, os átomos de carbono se colocam nos interstícios da estrutura cristalina do ferro. A consequência prática desse tipo de solução é que teremos uma liga de baixo custo e com possibilidades de uma grande variação nas propriedades dependendo do teor de carbono e do tratamento térmico utilizado.

Nas ligas ferro-carbono nota-se que haverá uma distorção do reticulado sempre que um átomo de carbono se colocar em um interstício. Na Figura 2.9 é possível se observar uma representação dessa situação.

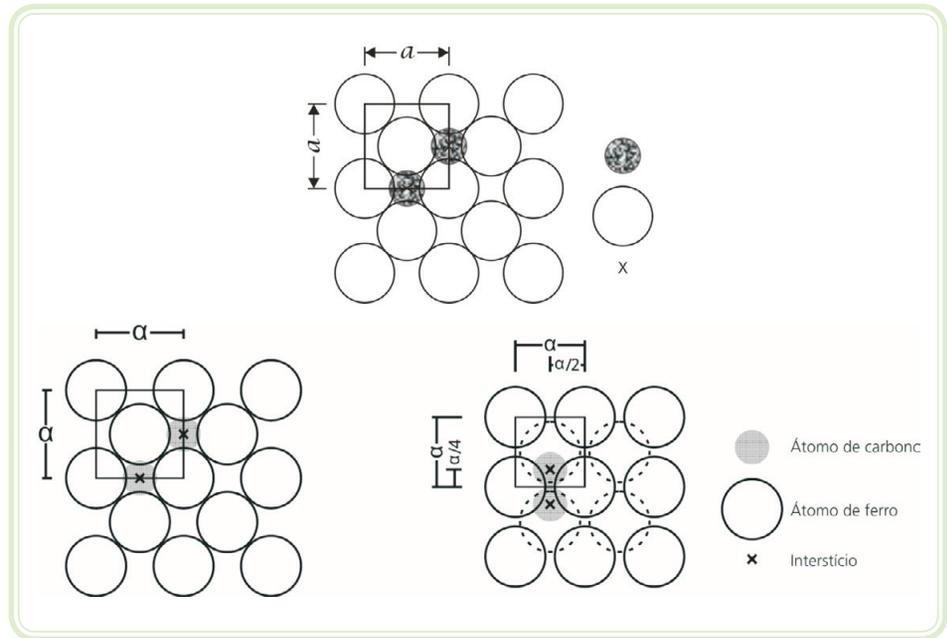


Figura 2.9: Relação entre a dimensão do átomo de carbono e o interstício octaédrico em uma estrutura CFC (à esquerda) e CCC (à direita)

Fonte: Van Vlack, 1984

Quando a solução ferro-carbono é formada, os átomos de carbono alocar-se-ão nos interstícios octaédricos (pois ficam melhor acomodados), o que implica menor energia de distorção.

Percebe-se então que haverá menor solubilidade do carbono no ferro α do que no ferro γ . No caso do ferro α , a solubilidade máxima do carbono é de aproximadamente 0,025% em peso, a 727°C; já para o ferro δ , a solubilidade máxima é de 2,1% em peso, a 1148°C.

A seguir, na Figura 2.10 são mostradas as células unitárias dos constituintes do ferro, de acordo com a temperatura alcançada.

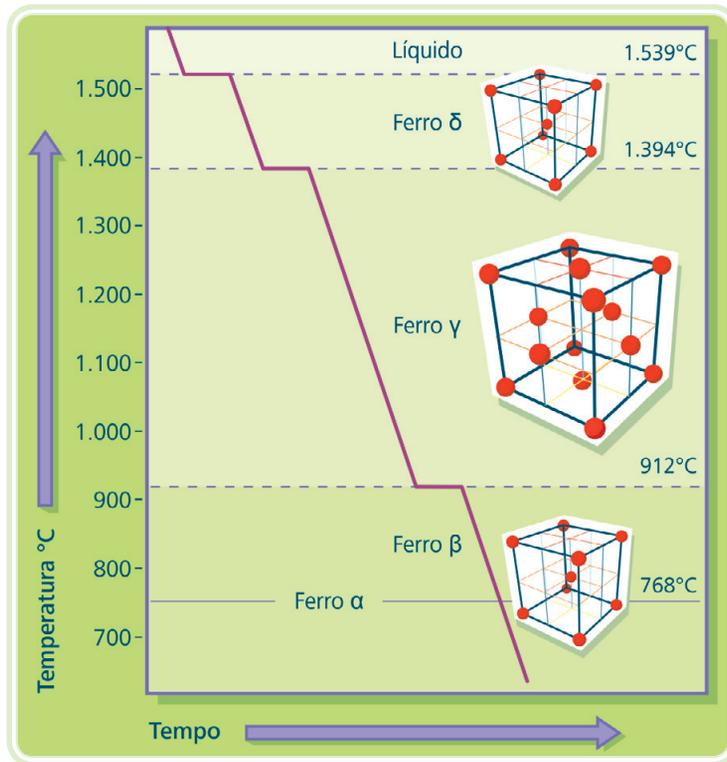


Figura 2.10: Formas alotrópicas do ferro puro

Fonte: CTISM, adaptado de http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/MR640/questresp_arquivos/image003.jpg

2.11 Influência dos elementos de liga

As ligas metálicas podem sofrer influências de diversos elementos químicos. Para as ligas ferrosas os principais elementos de liga e suas respectivas alterações nas propriedades mecânico-metalúrgicas dos metais são discriminados no Quadro 2.1 e ilustrados na Figura 2.11.

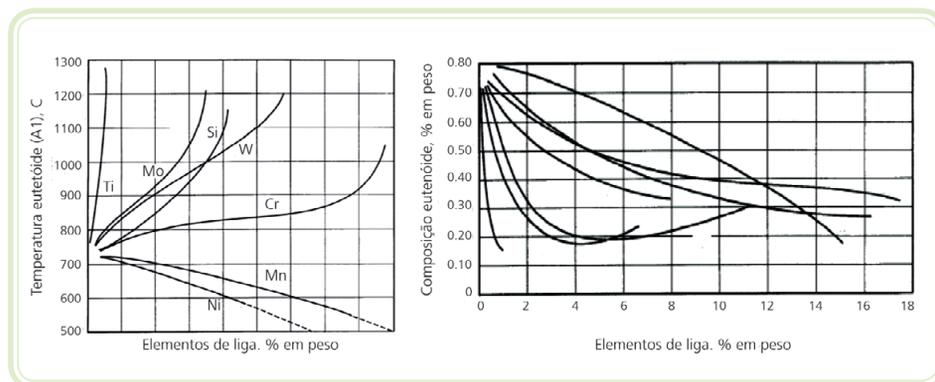


Figura 2.11: Influência dos elementos de liga na temperatura eutetóide

Fonte: Bain, 1939 apud Callister, 2002

Quadro 2.1: Principais elementos e suas ações nas ligas metálicas

Elemento	Propriedades na liga metálica
C	Eleva a dureza com baixo custo. Até 2,0% de C, em combinação com o Fe (aço), acima de 2,0% de C (ferro fundido). É elemento de liga desejável, porém teores altos desse elemento podem causar problemas; é necessário cuidado especial ao se soldarem aços de alto teor de carbono e ferro fundido.
S	Elemento indesejável no aço (causa fragilidade). Pode ser deliberadamente adicionado para melhorar a usinabilidade do aço. Todo esforço é feito para reduzir o teor de enxofre para o menor nível possível, porque ele pode criar dificuldades durante a soldagem.
Mn	Em teores de até 1,0% está normalmente presente em todos os aços de baixa-liga como agente desoxidante ou dessulfurante. Também aumenta a resistência à tração e a temperabilidade dos aços.
Cr	Aumenta a dureza dos aços, a resistência à corrosão e a resistência mecânica a altas temperaturas. Principal elemento de liga dos aços inoxidáveis.
Ni	Melhora a ductilidade ou sua tenacidade ao entalhe. É o mais eficaz dos elementos de liga para melhorar a resistência ao impacto do aço a baixas temperaturas. Quando combinado com o cromo dá origem ao grupo denominado aços inoxidáveis austeníticos.
Mo	Aumenta a profundidade de têmpera do aço. Usado em combinação com Cr para aumentar a resistência do aço em altas temperaturas.
Si	Agente desoxidante. Aumenta a resistência dos aços, mas quantidades excessivas podem reduzir a ductilidade. É algumas vezes adicionado para aumentar a fluidez do metal de solda.
P	Elemento residual nocivo nos aços. Reduz fortemente sua ductilidade e tenacidade. Todo esforço é feito para reduzir o teor de fósforo para os menores níveis possíveis.
Al	Agente desoxidante dos aços. Pode também ser adicionado em quantidades muito pequenas para controlar o tamanho dos grãos.
Cu	Aumenta a resistência à corrosão dos aços-carbono, porém altos teores de cobre podem causar problemas durante a soldagem.
Ni	Aumenta a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis.
W	Aumenta a resistência do aço em altas temperaturas. Eleva em grandes proporções a resistência à abrasão dos aços.
V	Mantém o tamanho de grão pequeno após tratamento térmico. Também ajuda a aumentar a profundidade de têmpera.
N	N, O e H causam fragilidade. É ocasionalmente adicionado aos aços inoxidáveis austeníticos para reduzir a quantidade de níquel necessária e, portanto, os custos de produção desses aços.

Fonte: Adaptado de Costa, 2003

No Quadro 2.2, são mostradas as propriedades inerentes a materiais, tais como as ligas metálicas, importantes para o entendimento dos objetivos a serem alcançados pelos tratamentos térmicos. Em seguida, são elencadas algumas propriedades mecânicas de aços, nas Tabelas 2.2 e 2.3 e na Figura 2.12.

Quadro 2.2: Principais propriedades de materiais

Propriedade	Conceitos
Densidade	Quantidade de matéria alocada dentro de um volume específico.
Ponto de fusão	Temperatura na qual o material passa do estado sólido para o líquido.
Ponto de ebulição	Temperatura na qual o material passa do estado líquido para o estado gasoso (ou vapor).
Dilatação térmica	Modificação nas dimensões de um material por causa da variação de temperatura.
Condutividade térmica	Capacidade do material de conduzir calor.
Condutividade elétrica	Capacidade do material de conduzir eletricidade.
Resistividade	Resistência do material à passagem de corrente elétrica.
Resistência à corrosão	Capacidade do material resistir à deterioração causada pelo meio no qual está inserido.
Resistência mecânica	Propriedade que permite que o material seja capaz de resistir à ação de determinados tipos de esforços, como a tração e a compressão.
Elasticidade	Capacidade do material em se deformar quando submetido a um esforço e voltar ao estado original quando retirado o referido esforço.
Plasticidade	Capacidade do material em se deformar quando submetido a um esforço e manter uma parcela da deformação quando retirado o esforço.
Ductilidade	Capacidade do material deformar-se plasticamente sem se romper.
Tenacidade	Quantidade de energia necessária para romper um material.
Dureza	Resistência do material à penetração, à deformação plástica e ao desgaste.
Fragilidade	Baixa resistência aos impactos e pequena capacidade de absorver energia antes de fraturar.

Fonte: Moreira, 1998

Tabela 2.2: Propriedades mecânicas de aços-carbono recozidos

Carbono %	Limite de escoamento		Limite de resistência à tração		Alongamento- em 2" %	Estricção %	Dureza Brinell
	kgf/mm ²	Mpa	kgf/mm ²	Mpa			
0,01	12,5	125	28,5	275	47	71	90
0,20	25,0	250	41,5	405	37	64	115
0,40	31,0	300	52,5	515	30	48	145
0,60	35,0	340	67,0	660	23	33	190
0,80	36,5	355	80,5	785	15	22	220
1,00	36,5	355	75,5	745	22	26	195
1,20	36,0	350	71,5	705	24	39	200
1,40	35,5	340	69,5	685	19	25	215

Fonte: Oliveira, 2007

Tabela 2.3: Propriedades mecânicas de aços-carbono normalizados

Carbono %	Limite de escoamento		Limite de resistência à tração		Alongamento	Estricção %	Dureza Brinell
	kgf/mm ²	Mpa	kgf/mm ²	Mpa			
0,01	18,0	180	31,5	305	45	71	90
0,20	31,5	305	45,0	440	35	60	120
0,40	35,5	345	59,5	585	27	43	165
0,60	42,0	410	76,5	755	19	28	220
0,80	49,0	480	94,0	920	13	18	260
1,00	70,0	690	106,5	1045	7	11	295
1,20	70,0	690	107,0	1050	3	6	315
1,40	67,0	660	103,5	1015	1	3	300

Fonte: Oliveira, 2007

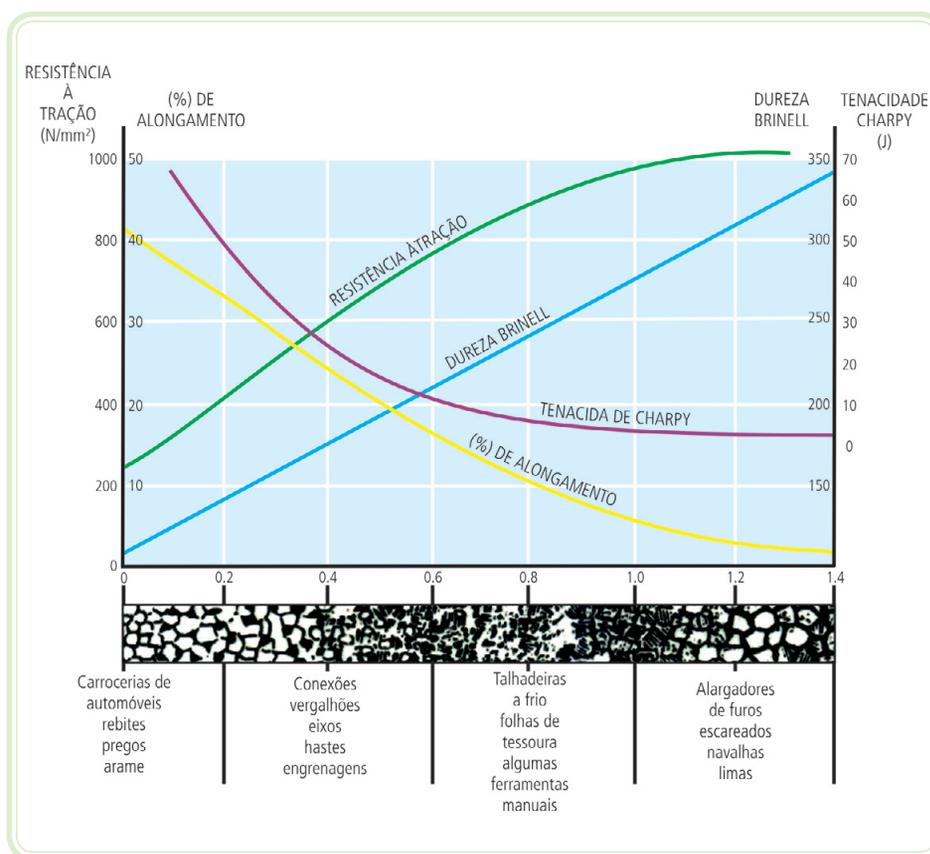


Figura 2.12: Propriedades mecânicas e aplicações de aços-carbono recozidos

Fonte: Oliveira, 2007

Resumo

Nesta aula estudou-se como as ligas compostas por ferro e carbono são formadas, de sua origem até o seu ciclo de produção.

Estudou-se que essas ligas possuem características particulares, estruturas cristalinas típicas e podem ter suas propriedades estruturais e mecânicas influenciadas por diversos elementos químicos diferentes, que os aços podem ser classificados de diversas formas, como quanto ao teor de carbono e ao teor dos elementos de liga. Por fim, estudaram-se algumas das principais propriedades mecânicas dos aços.

Atividades de aprendizagem

As atividades que você realizará ocorrerão no decorrer dos estudos e serão fundamentais em seu processo de aprendizagem e avaliação. Discuta através do ambiente virtual de aprendizado com o seu tutor os novos conceitos vistos nesta segunda aula.



Agora, depois de esclarecer dúvidas com o seu tutor, você está preparado para realizar a segunda atividade. Em sequência, será corrigido o exercício que somará como conteúdo, para a realização da primeira avaliação.

1. Descreva, sucintamente, o processo de fabricação das ligas ferro-carbono.
2. Classifique as ligas ferro-carbono (aços) quanto ao teor de oxigênio.
3. Classifique as ligas ferro-carbono (aços) quanto ao teor de carbono.
4. Classifique as ligas ferro-carbono (aços) quanto ao teor dos elementos de liga.
5. De acordo com a classificação normativa dos aços (ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, SAE – *Society of Automotive Engineers* e AISI – *American Iron and Steel Institute*), classifique um aço AISI 4340 e um AISI 1045.
6. Classifique os aços quanto sua estrutura cristalina. Cite, ainda, os principais defeitos na rede cristalina que podem ocorrer.
7. Quais são as formas alotrópicas do ferro puro?

Aula 3 – O diagrama de equilíbrio ferro-carbono

Objetivos

Interpretar e classificar os diagramas de fases de ligas ferrosas.

Reconhecer as características das transformações termicamente induzidas a uma mesma faixa de temperatura, ou seja, a ocorrência de mudança de fase.

3.1 Características principais

As ligas ferro-carbono constituem os materiais de maior aplicação industrial atualmente. Isso se deve ao fato dessas ligas apresentarem uma grande variação nas suas propriedades pela simples variação na quantidade de carbono e ainda possibilitarem uma gama maior de propriedades, se forem consideradas as nuances existentes em cada tratamento térmico.

A adição de carbono ao ferro traz modificações aos limites de temperatura em que são estáveis as diferentes formas estruturais, como também faz surgir novos tipos de transformações e novos componentes do sistema.

As transformações em uma liga ferro-carbono são influenciadas basicamente pela temperatura, e como foi visto anteriormente, pelo teor de carbono. Se estes dois fatores forem considerados, pode-se traçar um mapa das transformações denominado **diagrama de equilíbrio**.

Vale ressaltar, para o sistema Fe-Fe₃C (ferro-cementita) que:

Ferro puro – contém até 0,002% de carbono.

Aço – contém de 0,002% até 2,06% de carbono.

Ferro fundido – contém de 2,06% a 4,5% de carbono.

Na Figura 3.1 mostra-se o diagrama de equilíbrio ferro-carbono.

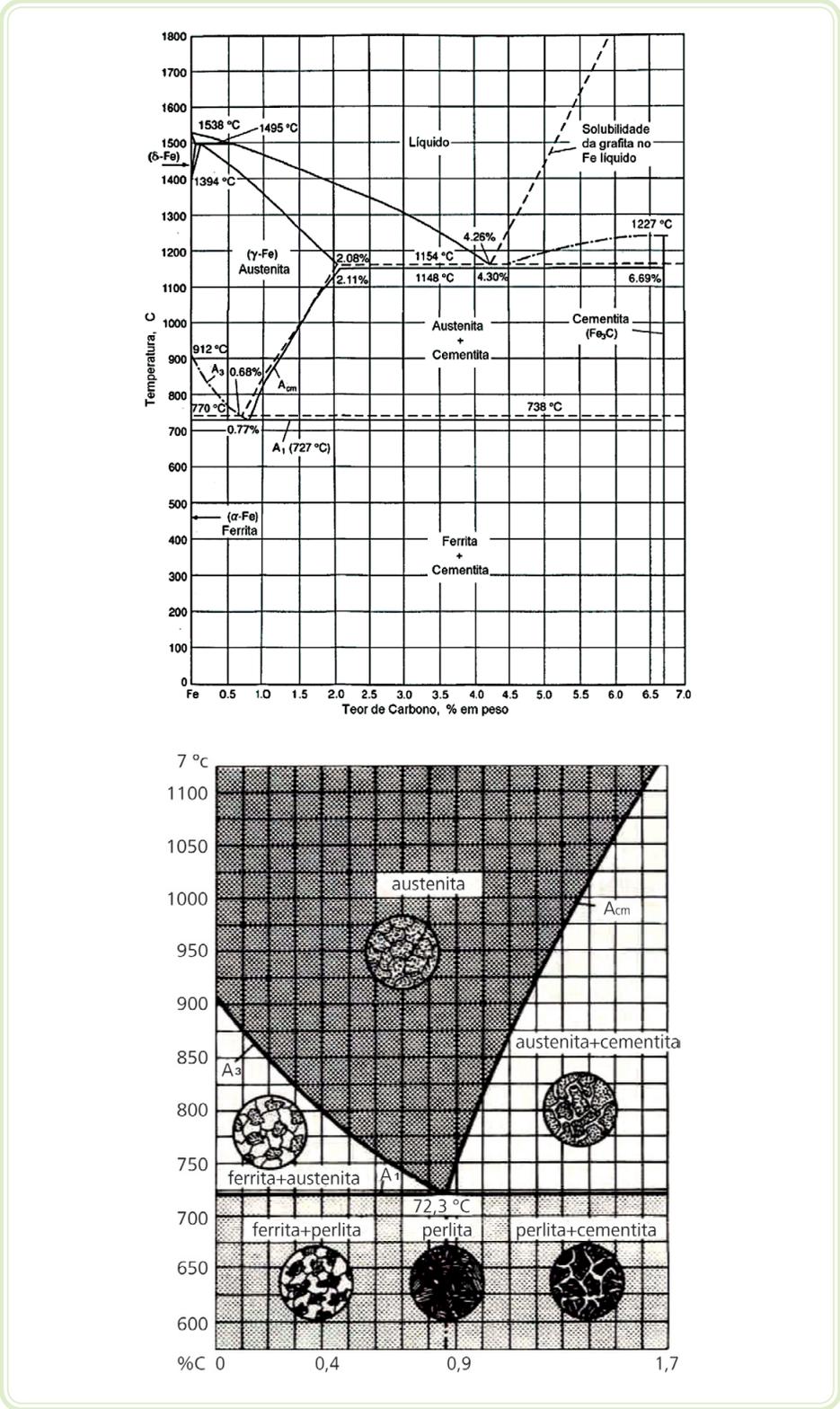


Figura 3.1: Diagrama de equilíbrio ferro-carbono (acima) e detalhe que enfatiza a zona pertencente aos aços no diagrama ferro-carbono (abaixo)

Fonte: Oliveira, 2007

Sendo:

Eixo das abscissas (horizontal) – representa a escala horizontal, com a porcentagem de carbono, por exemplo, 1% de C (99% Fe).

Eixo das ordenadas (vertical) – representa as várias temperaturas.

Linha A₃ – indica início da passagem da estrutura CFC para CCC durante o resfriamento.

Linha A₁ – indica o limite da existência de austenita; abaixo dessa linha, não temos austenita.

A_{cm} – indica o limite da quantidade de carbono dissolvido na austenita.

A análise do diagrama permite constatar que:

Surgem três reações, uma peritética a 1495°C, uma eutética, a cerca de 1148°C e outra eutetoide em 727°C.

Há de se considerar dois tipos de equilíbrio, o estável do sistema ferro-carbono (grafita – linha pontilhada) e o metaestável (cementita-carboneto de ferro com a estequiometria Fe₃C – linha cheia).

A adição de carbono faz com que os limites de temperatura em que são estáveis o Fe- α (ferrita) e o Fe- δ (ferrita δ) sejam reduzidos, enquanto no caso do Fe- γ (austenita) observa-se um alargamento significativo do campo de existência.

Para o estudo do tratamento térmico de aços, limita-se a análise da região do diagrama metaestável compreendida entre 0 e 2% C e dentre as três reações possíveis (eutética, peritética e eutetoide), bastará considerar unicamente a eutetoide observando que:

Um aço é definido como uma liga Fe-C em que o teor em carbono não ultrapassa a 2%, o que permite ignorar a transformação eutética.

Dentro deste domínio de composições só tem interesse considerar, do ponto de vista das formas habituais de processamento dos aços, o sistema metaestável ferro-cementita; isso porque os tempos necessários para induzir a grafitiza-

ção são longos demais para que esse fenômeno tenha alguma relevância no decorrer dos tratamentos térmicos dos aços.

No âmbito dos aços, a transformação peritética pode ser ignorada.

A estrutura de equilíbrio dos aços à temperatura ambiente é constituída por ferrita + cementita; para a composição eutetoide (cerca de 0,8% C) obtém-se normalmente uma microestrutura formada por lamelas alternadas de ferrita e cementita resultantes da reação eutetoide (austenita → ferrita + cementita).

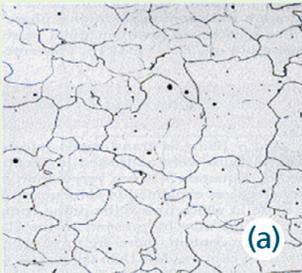
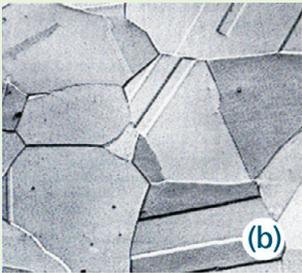
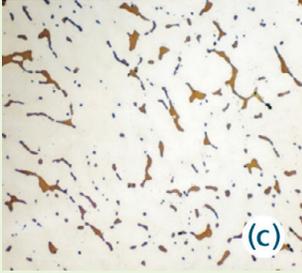
Em relação à composição eutetoide, os aços podem classificar-se em hipoeutetoides ($C < 0,8\%$) ou hipereutetoides ($C > 0,8\%$).

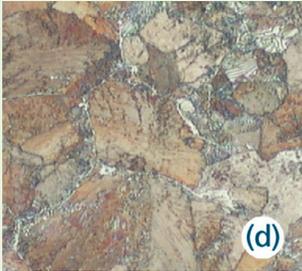
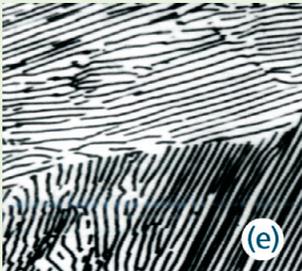
À medida que o teor em carbono diminui, afastando-se da composição eutetoide, a microestrutura sofre uma evolução que traduz uma variação contínua da quantidade relativa de nódulos de perlita e de grãos de ferrita:

- Para teores próximos da composição eutetoide ($0,6 < \%C < 0,8$) entre os nódulos de perlita aparecem pequenas regiões isoladas de grãos de ferrita proeutetoide, ou seja, que se forma a partir da austenita antes de atingir a temperatura de transformação eutetoide; esses grãos ferríticos, formam-se normalmente nos limites de grão da austenita.
- Para teores de carbono intermediários ($0,4 < \%C < 0,6$) a microestrutura encontra-se constituída por nódulos de perlita envolvidos por grãos ferríticos. Este modo de distribuição da ferrita proeutetoide permite delimitar claramente os limites de grão da austenita.
- Para teores de carbono muito baixos (abaixo de 0,1%) a estrutura é praticamente constituída de ferrita onde se encontrará uma microestrutura formada por grãos de ferrita nos quais se encontram dispersas pequenas concentrações de perlita.

Quando se afasta da composição eutetoide em sentido contrário (aumentando-se o teor em carbono) as lamelas de perlita são rodeadas de cementita (proeutetoide), a qual aparece isoladamente na periferia dos nódulos de perlita (para teores de carbono próximos de 0,8%), formando uma rede que envolve os grãos de perlita com espessura crescente, à medida que se aumenta o teor em carbono. Essa malha de cementita que envolve a perlita permite determinar aproximadamente o tamanho de grão da austenita.

As microestruturas descritas são decorrentes da estrutura próxima do equilíbrio, resultado de um resfriamento lento. Porém, os aços podem apresentar outras formas microestruturais. Uma das variantes consiste na que pode resultar de uma manutenção prolongada a uma temperatura ligeiramente abaixo da eutetoide. A cementita tende então a passar da forma de lamelas para a de glóbulos aproximadamente esféricos (esferoidita). No Quadro 3.1 é feito um pequeno resumo de cada característica dos constituintes do aço, em função do teor de carbono.

Quadro 3.1: Principais características dos constituintes do aço	
Características da ferrita ou Fe- α	Microestrutura
Estrutura – CCC (até a temperatura de 912°C).	
Material ferromagnético a temperaturas inferiores a 768°C.	
Solubilidade máxima do carbono – 0,002% em peso de C a 727°C.	
Macia e dúctil.	
Dureza – 90 Brinell.	
Resistência à tração – 340 MPa.	
Alongamento em 50,8 mm – 40%.	(a)
Características da austenita ou Fe- γ	Microestrutura
Estrutura – CFC (tem + posições intersticiais).	
Forma estável do ferro puro à temperatura entre 912°C até 1394°C. Não é ferromagnética.	
Solubilidade máxima do carbono – 2,14% em peso de C a 1147°C.	
É mais dura.	
	(b)
Características da ferrita ou Fe- δ	Microestrutura
Estrutura – CCC.	
Forma estável até a temperatura de 1394°C.	
Fase não-magnética do aço.	
É idêntica ao ferro- α .	
Estável somente a altas temperaturas (sem interesse industrial).	
	(c)

Características da cementita ou carbeto de ferro ou Fe ₃ C	Microestrutura
Surge quando se supera o limite de solubilidade do carbono no ferro (6,7% C).	
É dura e frágil.	
É um constituinte metaestável* com decomposição muito lenta em ferro α e C.	
Dureza – 650 Brinell.	
Resistência à tração – 30 MPa.	
Alongamento em 50,8 mm – 0%.	
Características da perlita	Microestrutura
Perlita (Fe + Fe ₃ C) – consiste de lamelas alternadas de fase " α " (ferrita) e Fe ₃ C (cementita).	
Ferrita – lamelas mais espessas e claras.	
Cementita – lamelas mais finas e escuras.	
Propriedades mecânicas da perlita – entre a ferrita (mole e dúctil) e a cementita (dura e frágil). Com dureza média de 300 Brinell.	
Resistência à tração – 850 MPa.	
Alongamento em 50,8 mm – 10%.	

*metaestável é um estado que possui precária estabilidade, podendo facilmente ser perturbado. Uma pequena perturbação determinará que um sistema em estado metaestável caia para um nível de energia mais baixo.

Fonte: (a) e (b) United Steel Corporation, 1971 apud Callister, 2002

(c) e (d) Oliveira, 2007

(e) Metals Handbook, 1985 apud Callister, 2002

3.2 Microestruturas hipoeutetoides, eutetoides e hipereutetoides

3.2.1 Ponto eutetoide

Pode ser descrito a partir da seguinte relação:

Austenita (fase α) \rightarrow fase α (ferrita) + Fe₃C (cementita)

Cujas características podem ser discriminadas a seguir:

Temperatura – 723°C.

Teor de carbono – 0,8%.

Aços com 0,002 - 0,8% de C são chamados de aços hipoeutetoides.

Aços com 0,8 - 2,06% de C são chamados de aços hipereutetoides.

Aços com 0,8% de C são chamados eutetoides.

A identificação e ilustração do ponto eutetoide são mostradas na Figura 3.2. e uma microfotografia de um aço-carbono eutetoide é mostrada na Figura 3.3.

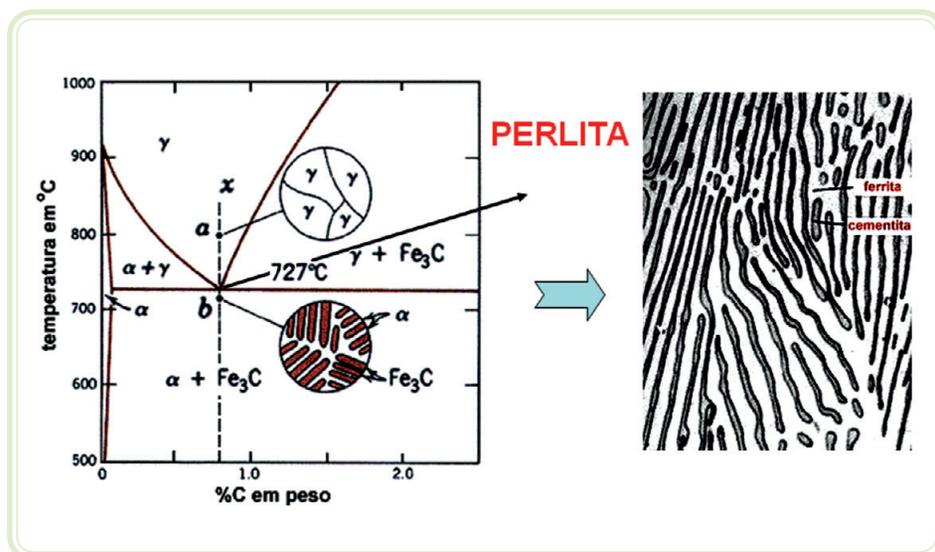


Figura 3.2: Formação da perlita no ponto eutetoide

Fonte: Metals Handbook apud Strohaecker, 2003



Figura 3.3: Aço carbono eutetoide (0,8% C), resfriado lentamente

Fonte: Metals Handbook, 1985 apud Callister, 2002

3.2.2 Aços hipoeutetoides

Supondo resfriamento lento para manter o equilíbrio, a microestrutura de um aço hipoeutetoide pode ser descrita como:

- Teor de carbono – de 0,002% a 0,8%.
- Estrutura – ferrita (α) + perlita ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$).
- As quantidades de ferrita e perlita variam conforme a porcentagem de carbono.
- As partes claras são compostas de ferrita (α) proeutetoide.

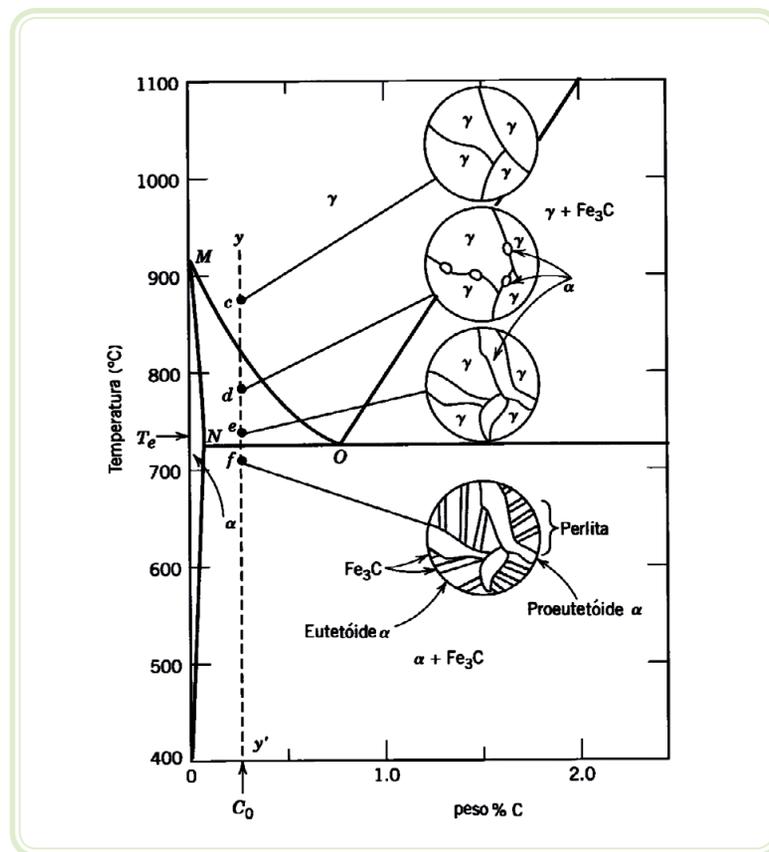


Figura 3.4: Formação da estrutura de um aço hipoeutetoide

Fonte: Callister, 2002

Na Figura 3.5 é mostrada uma microfotografia de um aço hipoeutetoide, com 0,35% C, resfriado lentamente.

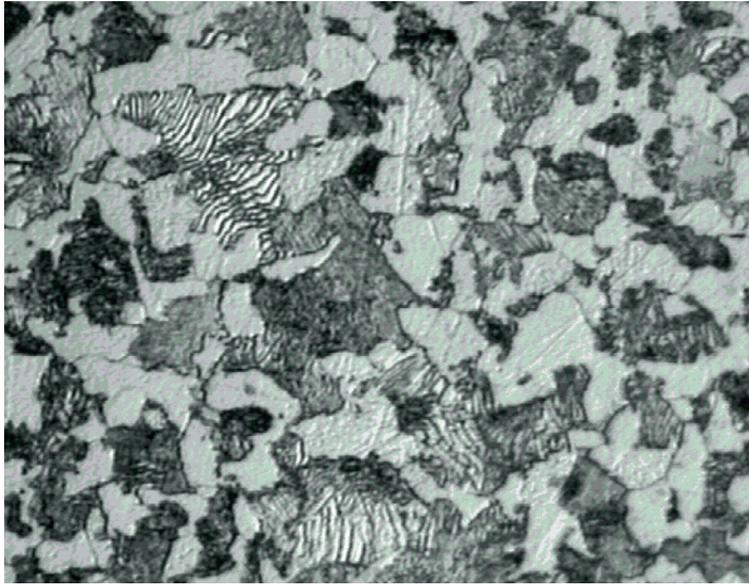


Figura 3.5: Aço com 0,35% C resfriado lentamente contendo textura granular

Fonte: Callister, 2002

3.2.3 Aços hipereutetoides

Partindo-se da mesma consideração realizada para um aço hipoeutetoide (resfriamento lento para que se mantenha um equilíbrio), as seguintes características são definidas para um aço hipereutetoide:

- Teor de carbono – 0,8% a 2,06%.
- Estrutura – cementita + perlita.
- As quantidades de cementita e perlita variam conforme a porcentagem de carbono.
- As partes claras são compostas de cementita proeutetoide.

Na Figura 3.6, é mostrado um aço desta natureza.

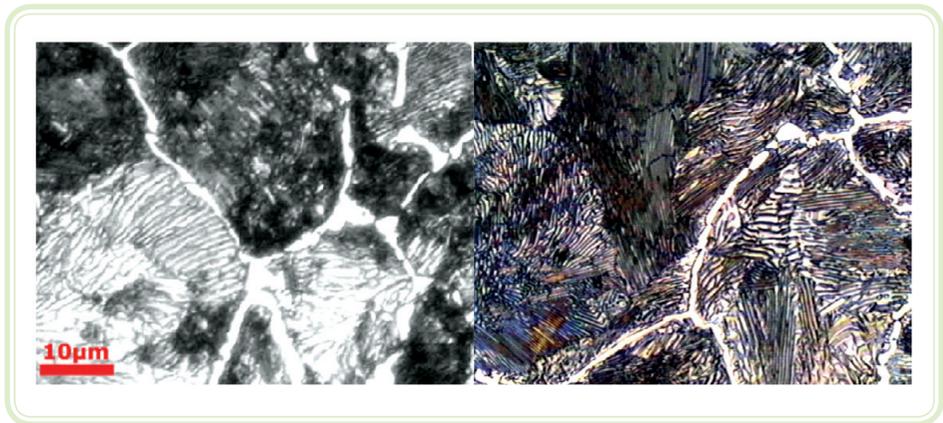


Figura 3.6: Aço carbono hipereutetoide resfriado lentamente, com 1,0% de carbono
 Fonte: Oliveira, 2007

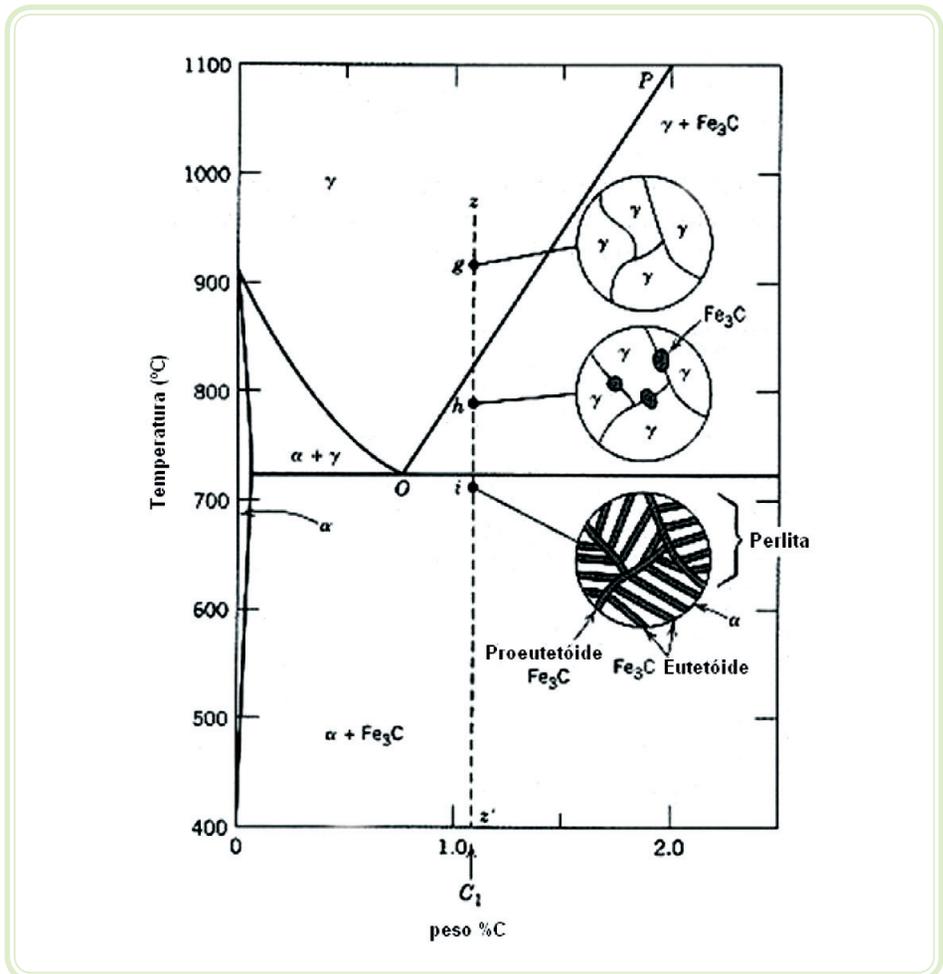


Figura 3.7: Formação da estrutura de um aço hipereutetoide
 Fonte: Callister, 2002

3.3 Ligas eutéticas

São aquelas formadas a partir da seguinte relação:

Líquido → fase γ (austenita) + Fe_3C (cementita)

Cujas características são as seguintes:

Temperatura – 1147°C.

Teor de carbono – 4,3%.

Ligas de ferro fundido de 2,06 -4,3% de C são chamadas de ligas hipoeutéticas.

Ligas de ferro fundido acima de 4,3% de C são chamadas de ligas hipereutéticas.

3.4 Zona crítica

A região compreendida entre as linhas A_1 e A_3 do diagrama Fe-C, para os aços carbonos hipoeutetoides e A_1 e A_{cm} para os aços carbonos hipereutetoides (detalhes mostrados na Figura 3.1) é chamada de zona crítica e é de grande importância conhecer esta região para a realização dos tratamentos térmicos dos aços-carbono.

Quando se aquece o aço e se atinge a zona crítica, ocorre o início da austenitização da perlita, tanto para os aços hipo, hiper e eutetoides. A diferença existente na zona crítica para cada um desses aços reside no fato de os constituintes serem formados após ingresso nessa região.

Para os hipoeutetoides, a perlita se transforma em austenita, e a ferrita que se encontra fora dos grãos de perlita (ferrita proeutetoide) permanece sem alterações.

Para os eutetoides, a 727°C, 100% da perlita é convertida em austenita, não havendo, para esse aço zona crítica, mas **temperatura crítica**, que é a temperatura na qual haverá o início da reação de austenitização da perlita.

Para os hipereutetoides, a perlita transformar-se-á em austenita, assim como nos hipoeutetoides. A diferença está no constituinte proeutetoide, que será a cementita, tendo em vista que o aço possui maior teor de carbono do que o da constituição eutetoide.

3.5 Zona de austenitização

A zona de austenitização é compreendida pela região formada acima das linhas A_3 e A_{cm} e se caracteriza pela existência de austenita em sua totalidade, ou seja, não haverá nenhum constituinte proeutetoide existente nesta região para todos os aços (hipo, hiper e eutetoides).

3.6 Cálculo do teor dos constituintes do aço (regra da alavanca)

Para que sejam calculadas as quantidades relativas de cada constituinte do aço a uma dada temperatura de trabalho, utiliza-se um procedimento matemático denominado **regra da alavanca**.

Em aços com diminuto teor de carbono, quanto mais próxima estiver a composição do aço do campo ferrítico, maior será a quantidade relativa da ferrita em relação ao todo. Seguindo-se essa linha de raciocínio, utiliza-se uma regra de três simples para se conhecer o teor relativo de ferrita no aço, que será a composição da austenita, subtraída da nominal, dividida pela diferença entre a composição da austenita (0,77%) e da ferrita (0,025%) em uma temperatura conhecida, conforme expressão a seguir demonstrada.

Dado um aço carbono com 0,45% na temperatura de 727°C (temperatura da reação eutetoide).

$$\% \text{ ferrita} = \frac{(0,77 - 0,45)}{(0,77 - 0,025)} \times 100\% = 43\%$$

Donde se conclui que um aço com 0,45% de carbono possui 43% de ferrita na temperatura próxima da eutetoide (727°C).

Avançando-se para composições do aço a pontos vizinhos do eutetoide, o teor de perlita aumenta em grandes proporções. Para os aços hipereutetoides, no entanto, haverá um domínio da perlita. Tomando-se como base um aço com 1,2% C, tem-se:

$$\% \text{ perlita} = \frac{(6,67 - 1,2)}{(6,67 - 0,77)} \times 100\% = 92,7\%$$

Agora, o braço da regra da alavanca tende para a perlita, tendo em vista que a composição de carbono no aço está mais próxima do teor eutetoide em

relação ao de cementita. A Figura 3.8 demonstra a distribuição das fases em função do teor de carbono no aço.

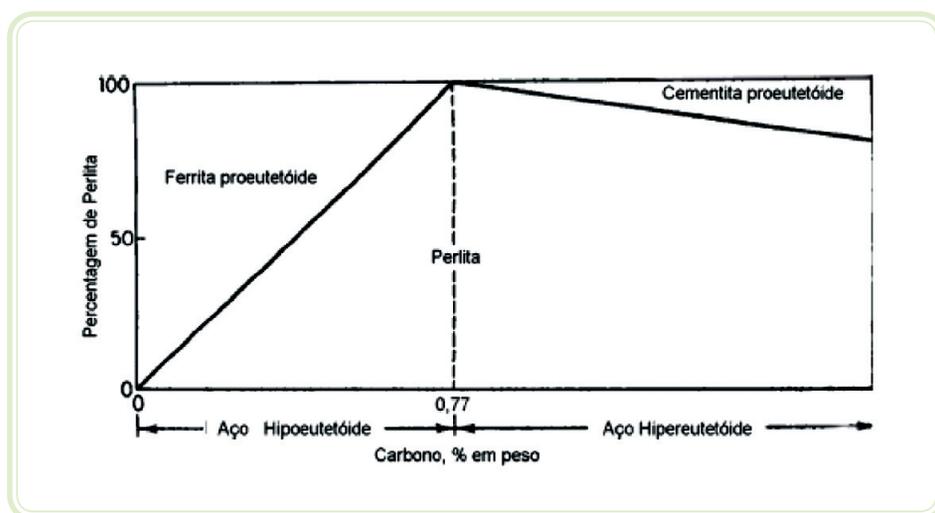


Figura 3.8: Demonstrativo da porcentagem de perlita no aço em função do teor de carbono
Fonte: Leslie, 1982 apud Strohaecker, 2003

3.7 Fases metaestáveis do aço

3.7.1 A formação da martensita

Ferrita mais cementita, também conhecidas como perlita, são constituintes do aço eutetoide produtos de seu resfriamento lento ou moderado originários da austenita.

Nas condições citadas, a pequena variação de temperatura com o tempo favorece a difusão dos átomos nos arredores da austenita, passando os átomos de ferro para uma estrutura CCC, reação essa que ocorre através de nucleação e crescimento onde há grande difusão de carbono na rede cristalina do aço.

Para resfriamentos mais rápidos não haverá tempo suficiente para a difusão do carbono, que fica em solução.

Com o decréscimo da temperatura na austenita a uma temperatura menor que a eutetoide, haverá uma força que leva o ferro a mudar de estrutura, de FCC para CCC.

Na modificação de sua microestrutura, o excedente de carbono produzirá uma deformação ou cisalhamento na rede cristalina. Tal excesso de carbono levará o ferro a apresentar uma estrutura deformada do tipo TCC (tetragonal

de corpo centrado). Microscopicamente, a estrutura do aço passa a forma de agulhas, ao invés de lamelas decorrentes do resfriamento lento ou moderado.

A deformação provocada pelo excesso de carbono na rede cristalina faz com que o aço tenha resistência mecânica e dureza elevadas em grandes proporções quando comparadas aos aços resfriados lenta ou moderadamente.

O aquecimento do aço, seguido de resfriamento brusco é denominado **têmpera**, e a **martensita** é o seu resultado. A martensita é um constituinte metaestável do aço, não existindo seu campo de formação no diagrama Fe-C.

A martensita cuja estrutura é TCC é uma solução sólida supersaturada em carbono que fica preso à rede, distorcendo um de seus eixos, o que leva a um aumento da dureza da martensita.

Para se temperar um aço, recomenda-se de 0,3% a 0,6% de carbono, existindo aplicações específicas (molas e ferramentas) onde os teores de carbono chegam a 2%. A maior dureza alcançada ocorre com 0,6% de carbono. Uma quantidade de carbono mínima é necessária para que haja a distorção do reticulado cristalino, passando a estrutura do aço para TCC.

A distorção gera tensões que, na prática, fazem com que o aço não seja utilizado apenas com a têmpera. Sua elevada fragilidade leva à realização de um tratamento térmico de revenimento (aliviando as tensões) variando de 150 até 738°C.

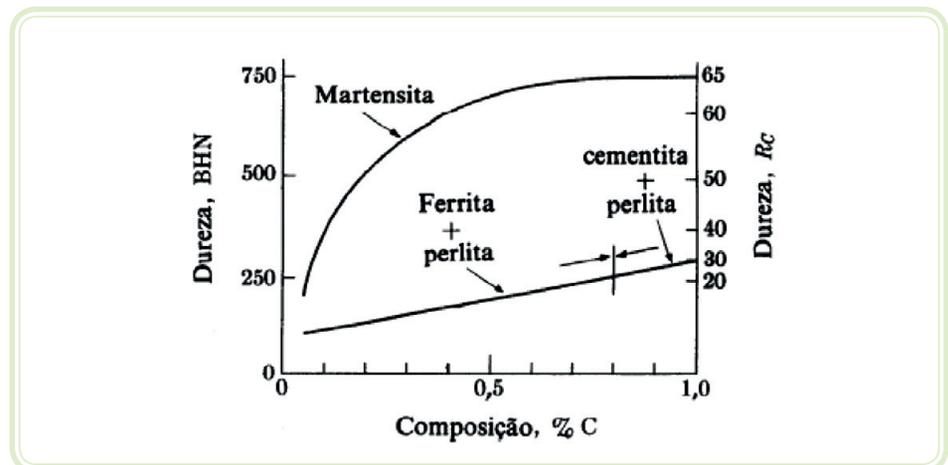


Figura 3.9: Variação na dureza de acordo com o aumento do teor de carbono
Fonte: Van Vlack, 1984



Figura 3.10: Martensita, com agulhas sobre um fundo de austenita retida

Fonte: Hume-Rothery, 1968 apud Strohaecker, 2003

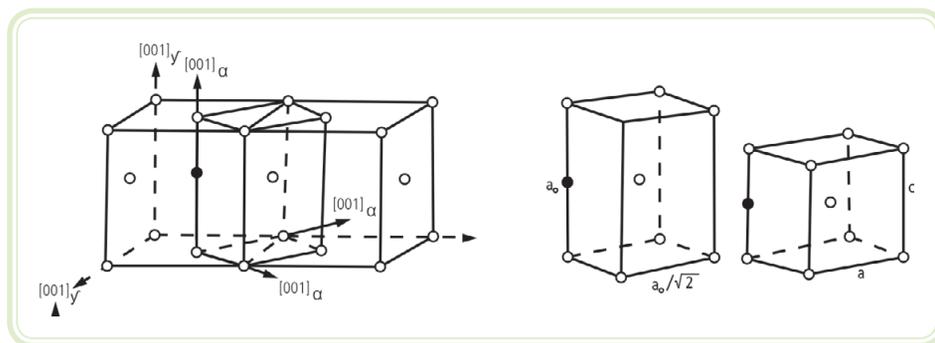


Figura 3.11: Transformação martensítica com distorção das células unitárias (à esquerda) e as estruturas TCC (ao centro) e CCC (à direita)

Fonte: Leslie, 1982 apud Strohaecker, 2003

3.7.2 A reação bainítica

Na reação perlítica, em que a austenita se transforma em ferrita e cementita, há grande difusão de carbono. Na reação martensítica, pelo contrário, não há difusão, mas cisalhamento, e quanto mais rápido for o resfriamento, mais martensita se formará.

A austenita, resfriada moderadamente até perto de 300°C, não fornece meios para a formação da estrutura perlítica, tendo em vista que a difusão do carbono nessa temperatura é prejudicada. O ferro, nas condições citadas, ao tentar passar de CFC para CCC, forma plaquetas descontínuas de cementita e cristais de ferrita. Tal estrutura é denominada **bainita**. A estrutura bainítica tem dureza e resistência mecânicas comparáveis a martensita revenida. Os carbonetos ficam dispersos na bainita em função da dificuldade de difusão do carbono.

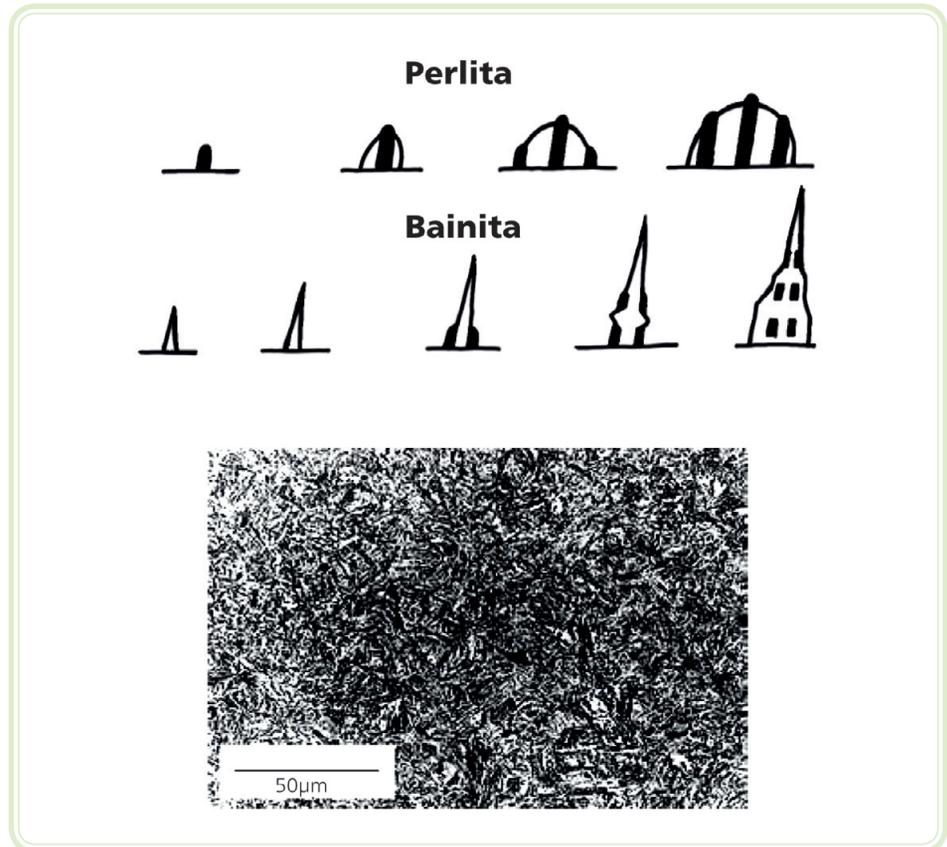


Figura 3.12: Formação da perlita (acima), da bainita (centro) e microfotografia da bainita
 Fonte: Avner, 1990 apud Strohaecker, 2003

Resumo

Nesta aula estudou-se o diagrama ferro-carbono, principalmente no trecho que corresponde aos aços.

Apreendeu-se a interpretar e classificar os diagramas de fases de ligas ferrosas e a caracterizar os aços em função de vários aspectos, como o teor de carbono, por exemplo.

Também se identificaram as fases constituintes do aço e as transformações termicamente induzidas a uma mesma faixa de temperatura, ou seja, a ocorrência de mudança de fase.

Atividades de aprendizagem



As atividades que você realizará ocorrerão no decorrer dos estudos e serão fundamentais em seu processo de aprendizagem e avaliação. Discuta através do ambiente virtual de aprendizado com o seu tutor os conceitos vistos na terceira aula.

Agora, depois de esclarecer dúvidas com o seu tutor, você está preparado para realizar a terceira atividade. Em sequência, será corrigido o exercício que somará como conteúdo, para a realização da primeira avaliação.

1. Descreva as reações eutetóides para três tipos de aço: um hipoeutetóide ($\% C < 0,77\% C$), outro eutetóide ($\% C = 0,77\% C$) e por último, um aço hiperetotóide ($\% C > 0,77\% C$).
2. Dado um aço carbono comum com 0,20% na temperatura de 727°C (temperatura da reação eutetoide), calcule: o teor (%) de ferrita e de perlita nesse aço.
3. Dado um aço carbono comum com 0,77% na temperatura de 727°C (temperatura da reação eutetoide), calcule: o teor (%) de ferrita e de perlita nesse aço.
4. Dado um aço carbono comum com 1,15% na temperatura de 727°C (temperatura da reação eutetoide), calcule: o teor (%) de perlita e de cementita nesse aço.
5. Descreva resumidamente as reações de formação da bainita e da martensita a partir de um aço carbono comum constituído de ferrita e perlita.

Aula 4 – Curvas em C ou em TTT

Objetivos

Trabalhar com os diagramas TTT (Transformação – Tempo – Temperatura) conhecendo o seu comportamento.

Identificar os fatores que afetam a posição das curvas em C ou em TTT.

4.1 Diagramas de transformação isotérmica

Um diagrama de equilíbrio, como o Fe-C possui diversas transformações de fase que ocorrem em determinadas temperaturas e que são dependentes da composição e da temperatura da liga.

Tais mudanças de fase existem considerando-se resfriamentos lentos e temperaturas fixas. Quando se necessita de informações adicionais a respeito dessas transformações com velocidades de resfriamento rápidas, por exemplo, necessita-se de outro diagrama, denominado **Diagrama Isotérmico ou Diagrama TTT (Tempo – Temperatura – Transformação)**.

Os diagramas TTT fornecem informações sobre os tipos de constituintes e seus respectivos percentuais com variadas velocidades e formas de resfriamento. Nesse gráfico, podem-se notar as mudanças de fase, onde haverá transformação parcial ou total do aço, em função do período de tempo no qual ele foi resfriado ou mantido a uma dada temperatura.

4.1.1 Diagrama isotérmico de um aço-carbono eutetoide

A Figura 4.1 apresenta o diagrama TTT de transformação isotérmica (à temperatura constante) do aço carbono eutetoide (0,77% C). No eixo vertical são mensuradas as temperaturas e no eixo horizontal os tempos de reação em escala logarítmica. Nesse diagrama há duas curvas que indicam os tempos de início e fim das modificações de fase no aço. A curva da esquerda indica o início da transformação e a da direita o seu término.

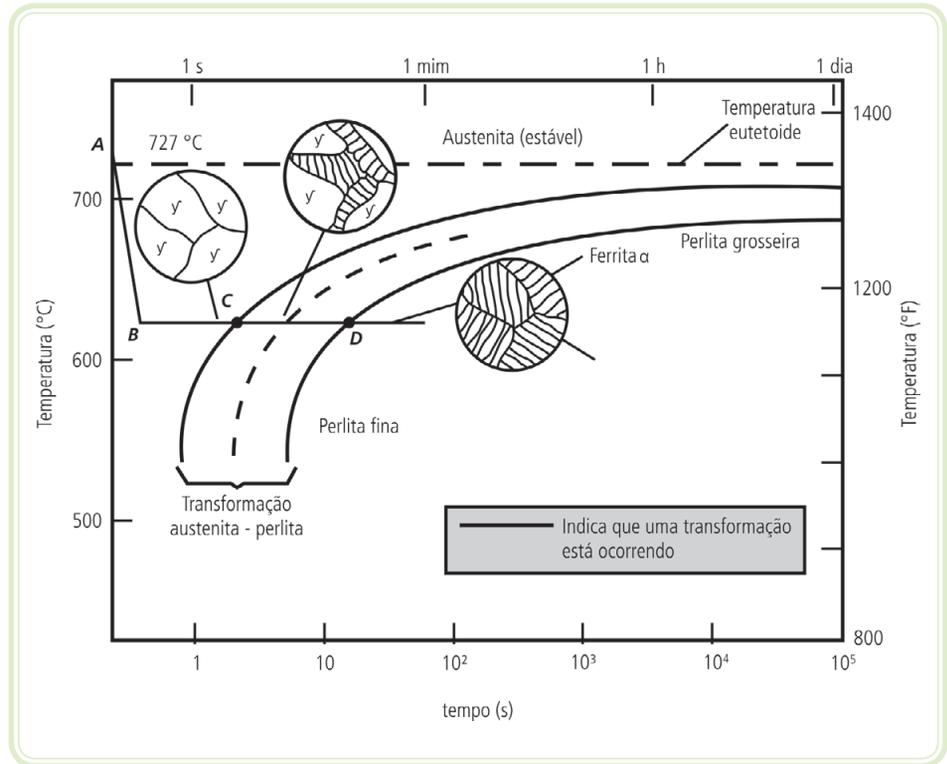


Figura 4.1: Diagrama TTT de transformação isotérmica do aço carbono eutetoide
 Fonte: Boyer, 1977 apud Callister, 2002

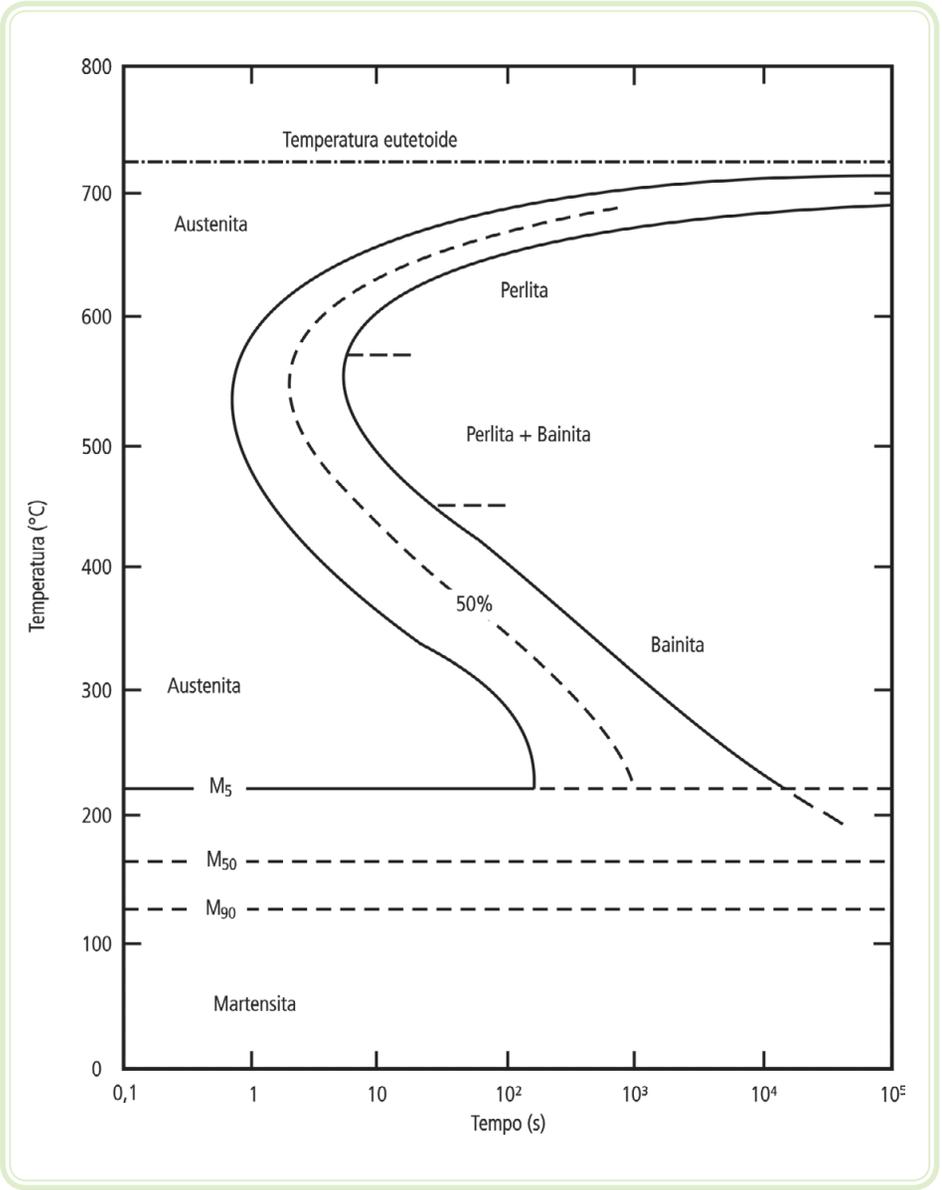


Figura 4.2: Transformação isotérmica para o aço carbono eutetoide

Fonte: Boyer, 1977 apud Callister, 2002

Na Figura 4.3, mostram-se curvas de resfriamento (tratamentos isotérmicos) para um aço carbono eutetoide.

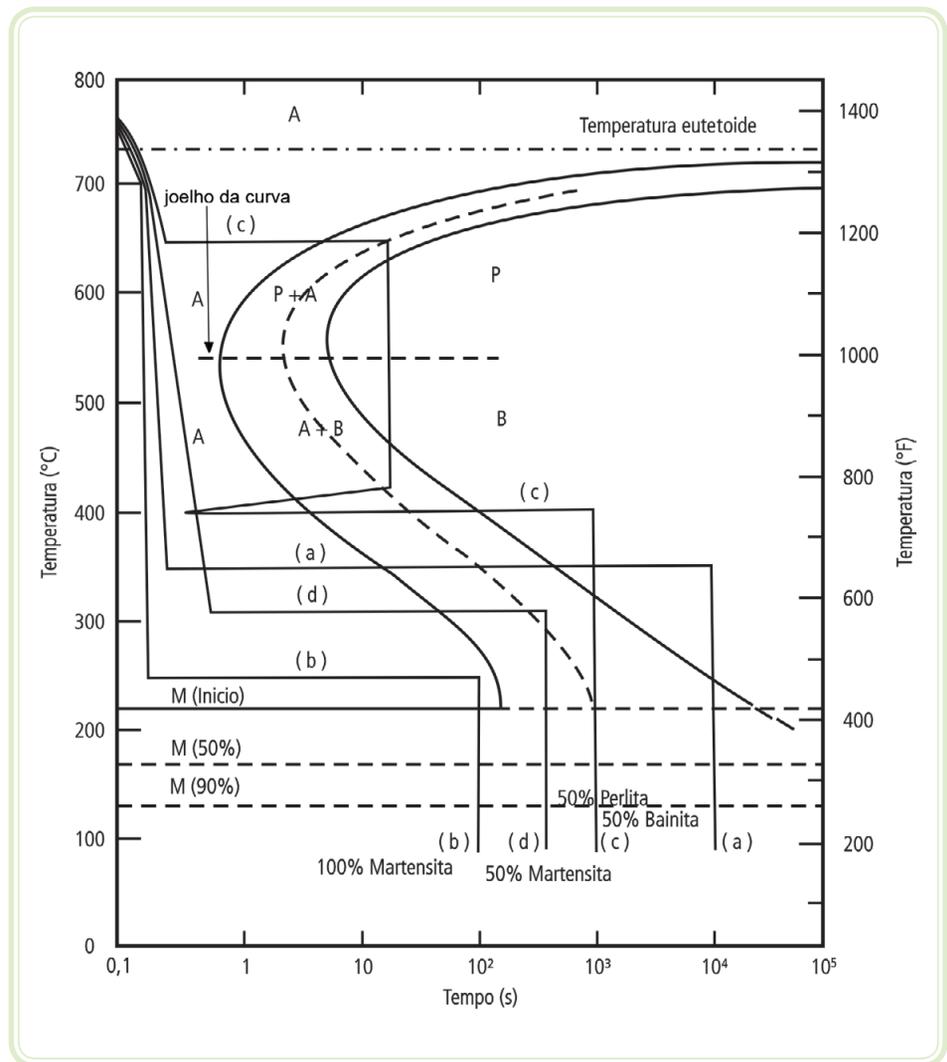


Figura 4.3: Tratamentos isotérmicos em um aço-carbono eutetoide (curvas "a", "b", "c" e "d")

Fonte: Adaptado de Callister, 2002

O "joelho" observado na Figura 4.3 é a representação do ponto no qual há uma modificação no aço, havendo acima e abaixo deste ponto, diferentes constituintes formados, em função do tempo de resfriamento da liga.

Na curva "a" ocorre resfriamento rápido até 350°C, mantendo-se a temperatura constante, na sequência, por 10⁴ segundos e, em seguida, realizando-se um resfriamento brusco até 25°C, o que ocasiona uma passagem da linha de resfriamento abaixo do "joelho" formado pelas curvas de transformação do aço, havendo 100% de transformação da perlita em austenita (reação austenítica completa).

Na curva “b”, o aço é resfriado velozmente até 250°C, onde ele permanece por 100 segundos a essa temperatura, seguindo-se com resfriamento brusco até 25°C. Para esta, o tempo necessário para a transformação completa é muito longo (horas), bem como o tempo necessário para iniciar a transformação da austenita. Dessa forma, com a continuidade do resfriamento rápido haverá formação da martensita, e o aço transformado será exclusivamente deste constituinte.

Observando-se a curva “c” constata-se que o aço sofreu resfriamento rápido até 650°C, mantido por 20 segundos nessa temperatura, onde ocorre a transformação de cerca de 50% de austenita em perlita. Depois dessa etapa, o aço é resfriado bruscamente até 400°C e mantido por 10^3 segundos, passando pela linha de transformação de austenita em bainita abaixo do “joelho”, ocorrendo o complemento da formação bainítica com resfriamento rápido de até 25°C. A composição final desse aço será de 50% bainita e 50% perlita.

Na curva “d” verifica-se resfriamento rápido do aço até cerca de 300°C. Depois ocorre a manutenção dessa temperatura por um tempo de 500 segundos com posterior resfriamento rápido de até 25°C. Nessa curva, o tempo de manutenção da temperatura permite transformar cerca de 50% da austenita em bainita em 300°C. Conclui-se que metade da microestrutura ainda se constitui de austenita não transformada. Resfriando-se o aço, essa austenita transformar-se-á em martensita quando a curva passar pela linha M_s . Por fim haverá uma microestrutura do aço composta 50% martensita e 50% bainita.

Das curvas obtidas e dos constituintes formados pode-se concluir que:

- Alcançar uma temperatura abaixo da eutetoide não implica transformações de fase, tendo em vista que as mesmas dependem da velocidade e do tempo de transformação.
- A transformação do aço e a desestabilização da austenita também poderão ocorrer quando um resfriamento rápido for executado.

Na Figura 4.4 mostra-se um diagrama isotérmico para o aço-liga 4340, contendo cromo, molibdênio e níquel. Os elementos de liga produzem alterações significativas nas posições e nas formas das curvas. O tempo de transformação de austenita para perlita fica mais deslocado e mais longo. É comum surgir em curvas mais complexas com diversas concavidades, também conhecidas como “joelhos”, separados para a formação da bainita.

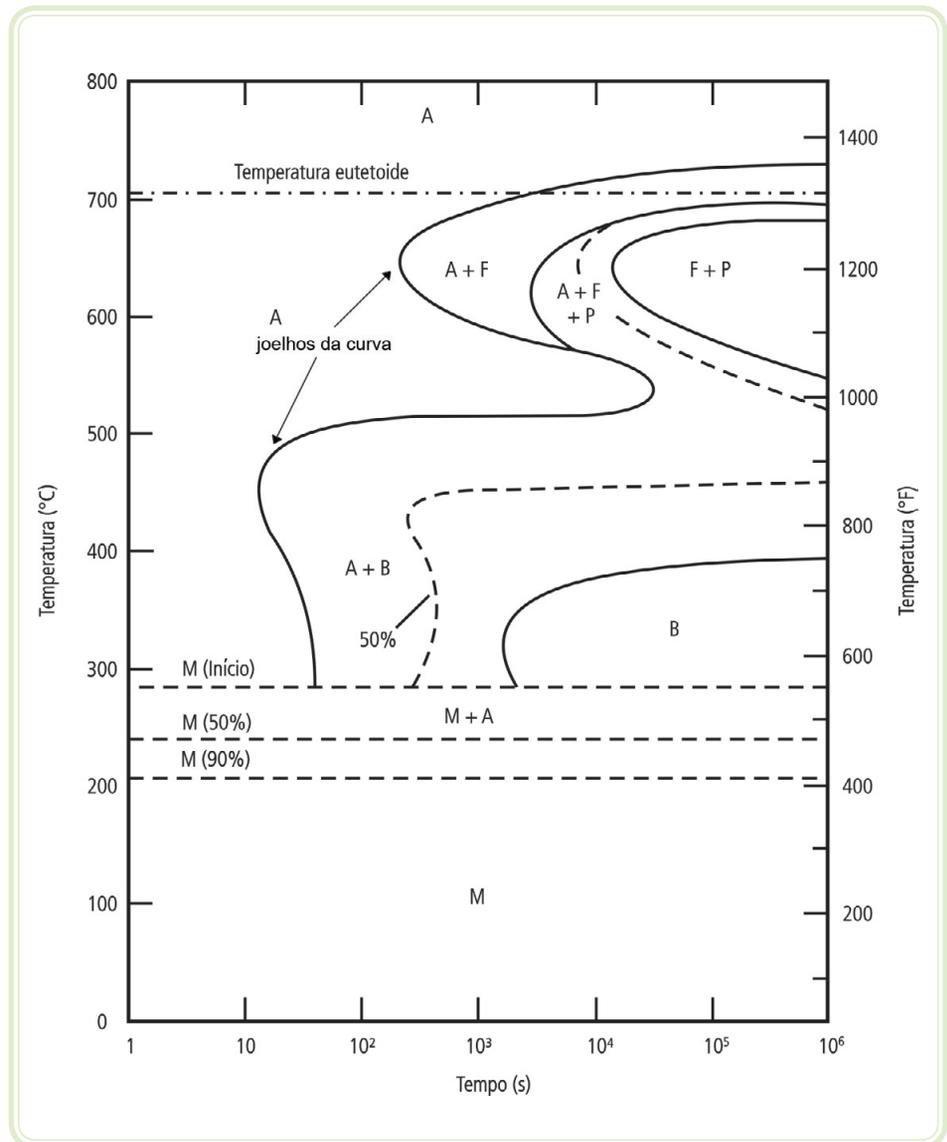


Figura 4.4: Transformação isotérmica do aço-liga 4340 (0,39% C, 1,78% Ni, 0,77% Cr, 0,28% Mo)

Fonte: Avner, 1990 apud Strohaecker, 2003

No diagrama TTT mostra-se que a velocidade de modificação dos constituintes do aço varia em função da temperatura, sendo baixa para temperaturas próximas da eutetoide, vai crescendo para temperaturas intermediárias e novamente decai nas temperaturas mais baixas, o que “produz” uma forma particular desses diagramas chamados “joelho” próximo a 500°C.

Perto de 200°C há ainda uma isoterma que indica o início da transformação da austenita em martensita (linha M(Início)). Essa mudança (reação martensítica) tem forte reação com a temperatura, pois não há difusão dos átomos.

Assim, o progresso de tal mudança de fase ocorre unicamente com diminuição da temperatura de tratamento térmico a valores próximos da temperatura ambiente, onde a transformação se completa.

Em temperaturas abaixo do “joelho” até a linha de formação da martensita há a transformação de austenita em bainita, compreendendo da bainita superior até a bainita inferior, contudo, para temperaturas acima do “joelho” há a transformação da perlita a partir da austenita.

4.1.2 Diagramas isotérmicos de aços hipoeutetóides e hipereutetóides

Os aços hipoeutetóides possuem um teor de carbono de menos de 0,77% e os hipereutetóides têm um teor de mais de 0,77%. Nas Figuras 4.5 e 4.6 são mostrados os diagramas isotérmicos de um aço hipoeutetoide e de um aço hipereutetoide, respectivamente.

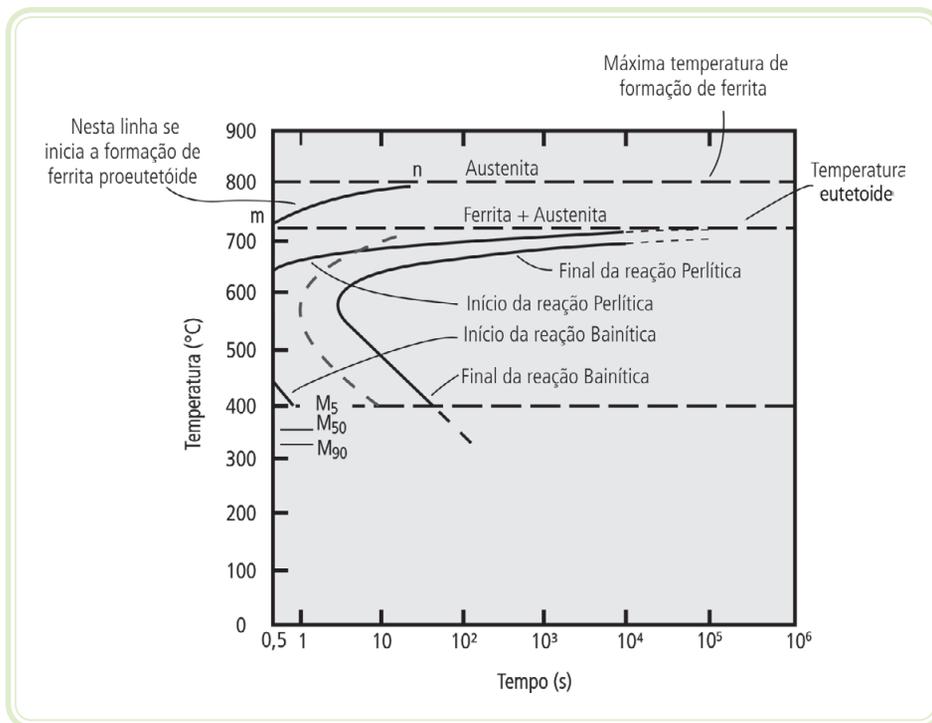


Figura 4.5: Curvas de transformação isotérmica de um aço hipoeutetoide (0,35% C)
Fonte: Reed-Hill, 1982 apud Strohaecker, 2003

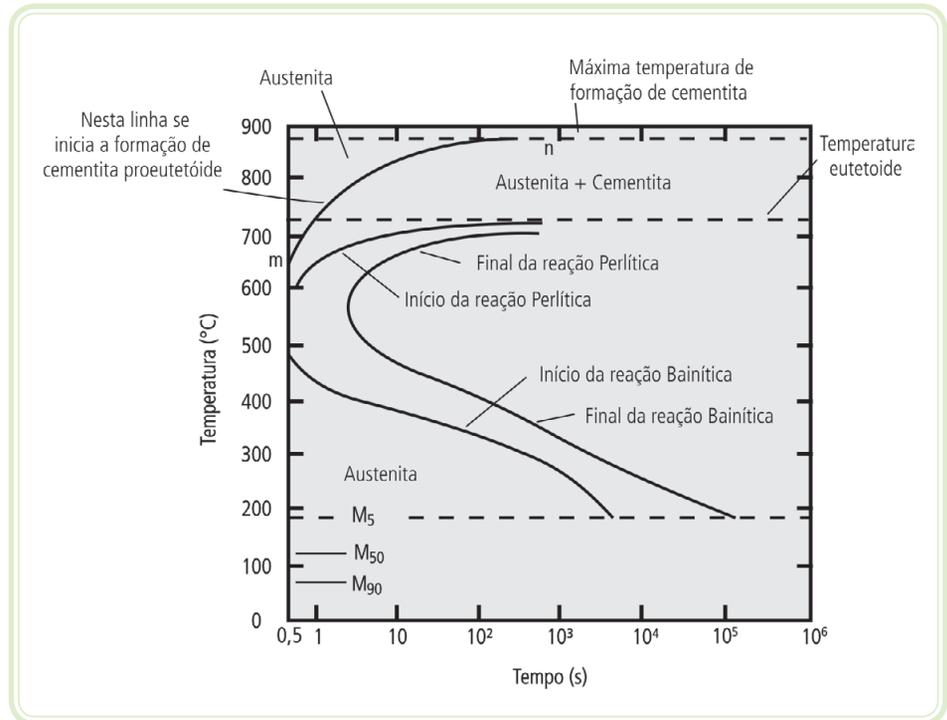


Figura 4.6: Curvas de transformação isotérmica de um aço hipereutetoide (1,13% C)
 Fonte: Reed-Hill, 1982 apud Strohaecker, 2003

Em comparação ao diagrama eutetoide, esses dois novos gráficos possuem um campo de formação de ferrita ou de cementita, conforme cada caso. Assim, a linha da esquerda aponta para o início da formação da ferrita ou da cementita; a linha central indica o início da transformação da perlita e a linha da direita o fim da transformação da perlita.

4.2 Diagramas de resfriamento contínuo

Nas ligas que são resfriadas de forma contínua, a temperatura decresce continuamente com o tempo, indo da temperatura de formação da austenita até a temperatura ambiente. Assim, o diagrama isotérmico não terá mais aplicação, pois a temperatura não se mantém constante durante as transformações de fase, sendo necessária a utilização de outra espécie de curva, denominada **diagrama de resfriamento contínuo**.

Nesse diagrama pode-se observar como as transformações de fase ocorrem em uma liga ferro-carbono-aço, quando se realiza resfriamento a uma taxa contínua no tempo.

Há algumas semelhanças nas transformações de fase quando comparadas às existentes no diagrama isotérmico, contudo existem mudanças em função da variação contínua da temperatura.

Pode-se observar na Figura 4.7 a sobreposição de um diagrama de resfriamento contínuo e um diagrama isotérmico. As curvas pontilhadas representam o diagrama isotérmico, e as curvas totalmente preenchidas representam o diagrama de resfriamento contínuo. Observa-se nessas curvas que há uma movimentação das transformações para a direita e para baixo quando se trata com resfriamentos contínuos. Assim, na curva de resfriamento "1" do diagrama isotérmico, seriam necessários seis segundos para se iniciar a transformação a 650°C. Já para o resfriamento contínuo esse tempo é superior ao dobro.

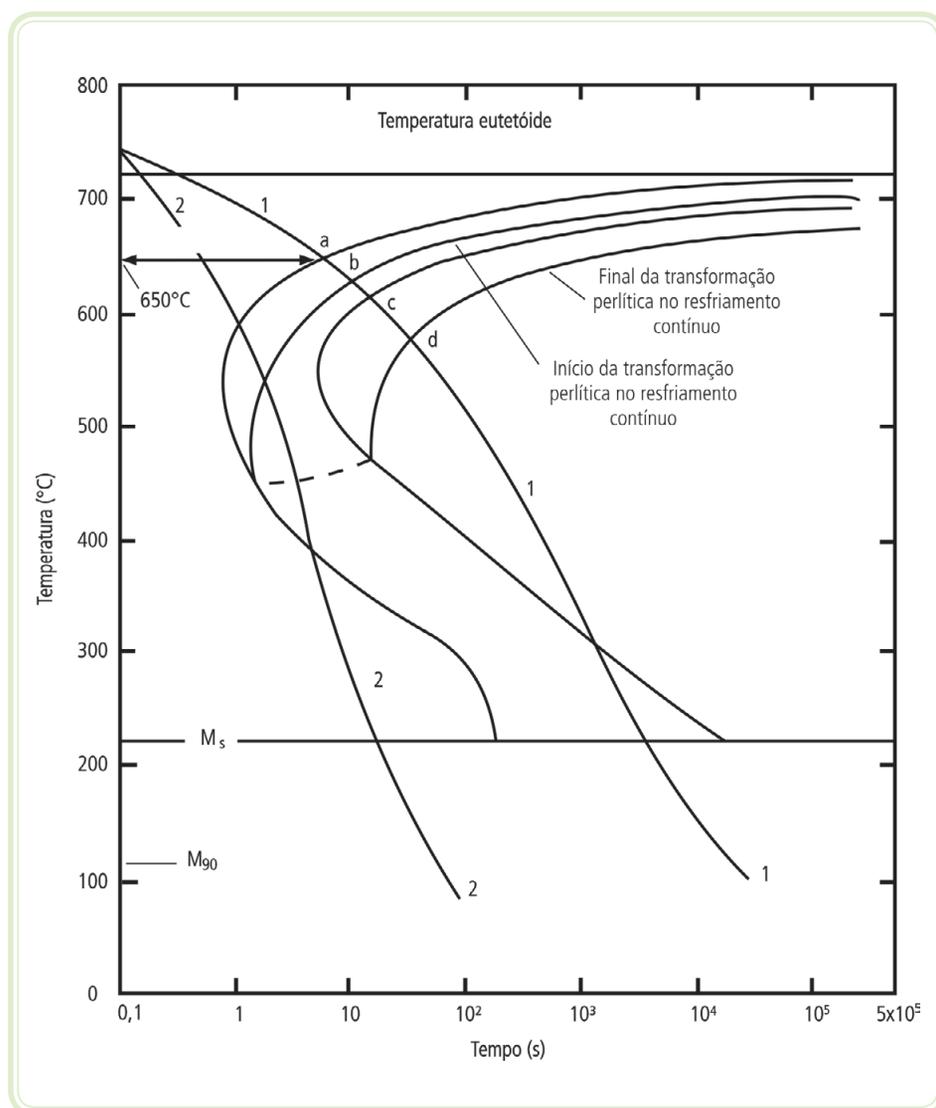


Figura 4.7: Sobreposição dos diagramas de resfriamento contínuo e isotérmico de um aço carbono eutetóide

Fonte: Reed-Hill, 1982 apud Strohaecker, 2003

No diagrama de resfriamento contínuo de um aço eutetóide, as transformações de fase verificadas são as mesmas do diagrama isotérmico. Há regiões

de formação da perlita, bainita e martensita. No entanto, o que distingue essa curva do diagrama isotérmico é que no resfriamento contínuo ocorre uma mistura de constituintes do aço em função da transformação se proceder em várias temperaturas no decorrer do resfriamento.

Mais heterogeneidade é verificada na liga em função da elevação da velocidade de seu resfriamento. Assim, dependendo dessa rapidez, pode-se ter perlita grosseira (em resfriamentos lentos), ou uma mistura de perlita e bainita (em resfriamentos moderados) e, inclusive, uma liga contendo perlita, bainita e martensita em equilíbrio na microestrutura (em resfriamentos mais rápidos).

Na Figura 4.8, é apresentado o diagrama de resfriamento contínuo de um aço com 0,38% C, 0,74% Cr e 0,51% Mo.

Na Figura 4.9, mostra-se o diagrama de resfriamento contínuo de um aço carbono hipoeutetoide, com 0,45% C, onde se identificam quatro curvas de resfriamento com os respectivos constituintes resultantes e suas durezas na escala Rockwell C (RC, ou H_{RC}), sendo que, para cada resfriamento verificado (em °C por segundo), haverá constituinte(s) formado(s) a partir da austenita.

Na curva "1" da mesma figura, obtêm-se, ao término do tratamento térmico, a uma taxa de resfriamento de 0,006°C/s (feito dentro do forno), ferrita e perlita grosseira (recozimento pleno). Na curva "2", a uma taxa de resfriamento de 0,02°C/s (ao ar livre), obtêm-se ferrita e perlita fina, além de bainita e martensita. Para a curva "3", a uma taxa de 0,3°C/s (óleo), obtêm-se bainita e martensita (têmpera) e na curva "4", o resfriamento rápido (em água) a uma taxa de 8,3°C/s é gerada unicamente martensita (têmpera).

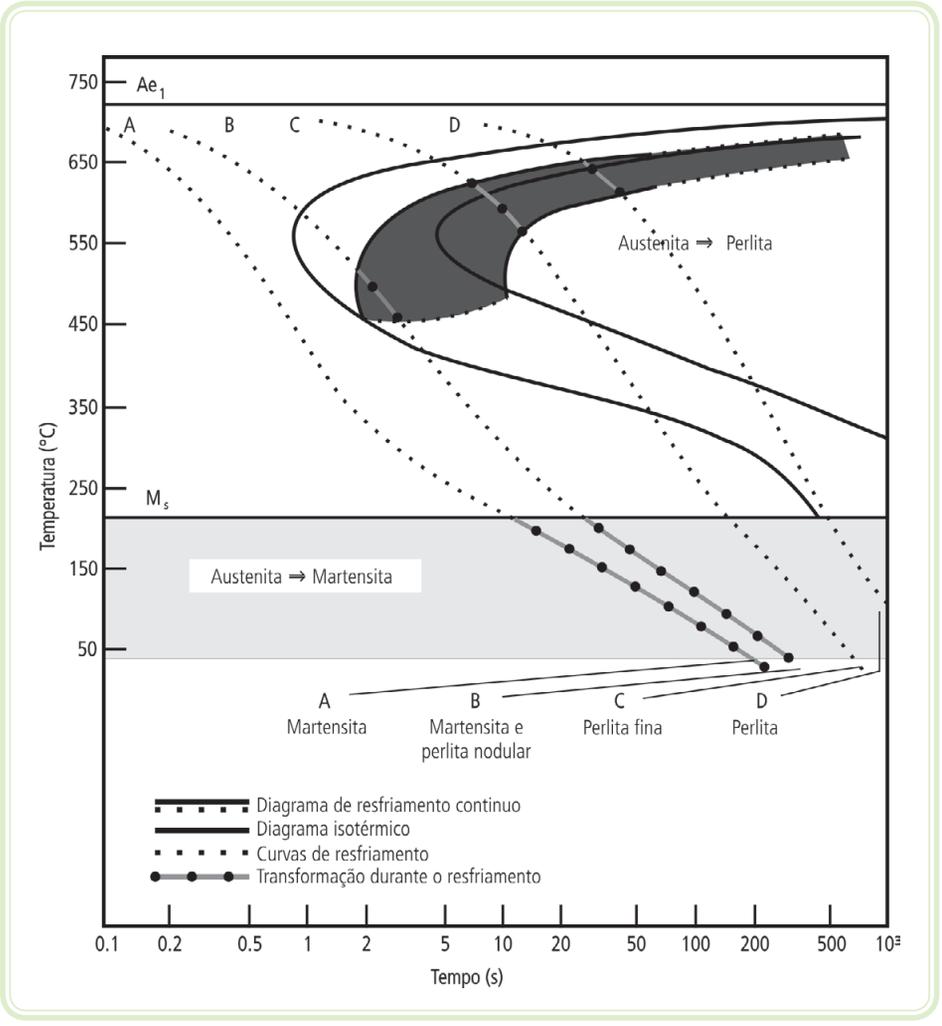


Figura 4.8: Curvas de resfriamento contínuo de um aço com 0,38% C, 0,74% Cr e 0,51% Mo
 Fonte: Adaptado de Oliveira, 2007

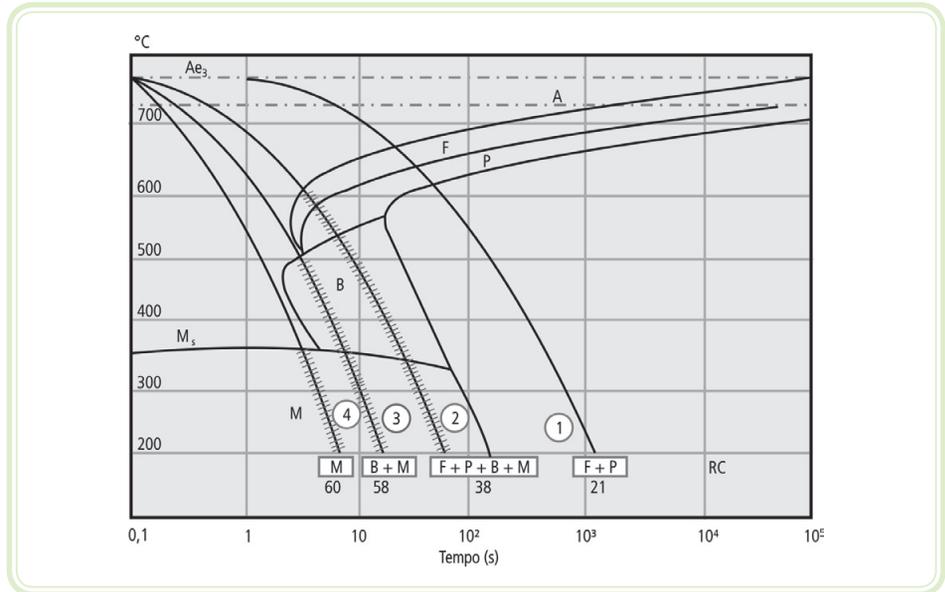


Figura 4.9: Curvas de resfriamento contínuo de um aço-carbono hipoeutetoide (1045)
 Fonte: Metals Handbook apud Strohaecker, 2003

Na Figura 4.10 é mostrado o diagrama isotérmico para o aço-liga, contendo molibdênio e níquel. Nesse gráfico pode-se observar que, quanto menor for o tempo dos tratamentos térmicos demonstrados pelas curvas de resfriamento contínuo, mais duro será o constituinte final do tratamento, o que pode ser ratificado pela dureza alcançada (números em círculos) de cada amostra obtida.

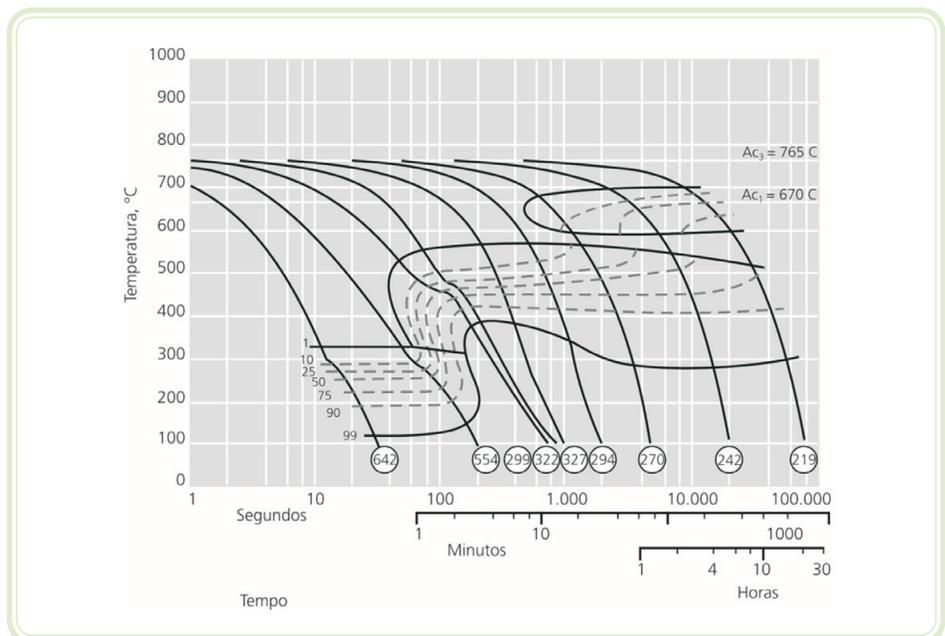


Figura 4.10: Curva TTT de resfriamento contínuo de um aço liga que possui 0,37% C, 1,4% Ni e 0,47% Mo
 Fonte: Metals Handbook apud Strohaecker, 2003

4.3 Fatores que afetam a posição das curvas em C ou em TTT

4.3.1 Teor de carbono

Quanto maior o teor de carbono e de elementos de liga no aço (com exceção do cobalto) mais para a direita se deslocam as curvas, facilitando a têmpera da liga ferro-carbono.

4.3.2 Tamanho do grão da austenita

Quanto maior o tamanho de grão da austenita antes do resfriamento, mais para a direita se deslocam as curvas, facilitando a têmpera.

As transformações iniciam-se nos contornos de grão, contudo, o aumento do tamanho de grão prejudica algumas propriedades mecânicas do aço como dureza, por exemplo.

4.3.3 Composição química (elementos de liga)

Quanto mais homogênea a austenita (sem partículas de carboneto, impurezas, etc.) mais para a direita se deslocam as curvas TTT, o que facilita a têmpera dos aços. Em geral quanto mais alta a temperatura de aquecimento e quanto maior o tempo de permanência mais homogênea a austenita será.

Resumo

Nesta aula, conheceram-se os diagramas TTT (transformação – tempo – temperatura), suas principais características e o seu comportamento mediante alterações no teor de carbono e o tempo e formas diversas de resfriamento.

Ainda se identificaram os principais fatores que afetam a posição das curvas em C ou em TTT e como eles alteram os gráficos em questão, proporcionando-lhes diferentes formatos.

Atividades de aprendizagem

As atividades que você realizará ocorrerão no decorrer dos estudos e serão fundamentais em seu processo de aprendizagem e avaliação. Discuta através do ambiente virtual de aprendizado com o seu tutor os conceitos vistos nesta quarta aula.



Agora, depois de esclarecer dúvidas com o seu tutor, você está preparado para realizar a quarta atividade. Em sequência, será corrigido o exercício que somará como conteúdo, para a realização da primeira avaliação. Vamos a ele!

1. O que é um diagrama TTT?
2. Descreva, de maneira sintética, como ocorrem os resfriamentos de aços isotérmica e continuamente, ressaltando as diferenças entre estes dois métodos de resfriamento.
3. O que representam os “joelhos” nos diagramas TTT?
4. Cite os fatores que afetam a posição das curvas em C ou em TTT.

Aula 5 – Fatores de influência nos tratamentos térmicos

Objetivos

Descrever as características dos fatores que influenciam no comportamento dos tratamentos térmicos.

5.1 O fator temperatura

Conhecer a temperatura de realização do tratamento térmico de uma liga metálica implica ter que trabalhar com o diagrama de equilíbrio ou de estado desse metal, pois cada liga possui o seu diagrama de transformação de fase. Outro fator determinante da temperatura de tratamento térmico é a microestrutura de interesse durante e ao término do tratamento térmico. No Quadro 5.1 são mostradas as colorações obtidas por peças de aço, quando aquecidas durante tratamentos térmicos (cores de têmpera).

Quadro 5.1: Cores típicas de peças durante a fase de aquecimento nos tratamentos térmicos

Cor	Temperatura (°C)	Aparência
Natural	Ambiente a 25°C	
Vermelho-marrom	600	
Vermelho-sangue	650	
Vermelho-cereja escuro	700	
Vermelho-cereja	760	
Vermelho-cereja claro	810	
Vermelho-claro	870	

Laranja	930	
Laranja-claro	980	
Amarelo-ouro	1050	
Amarelo	1100	
Amarelo-claro	1200	

Fonte: Adaptado de <http://static.hsw.com.br/gif/gear-helical1.jpg>; & <http://members.optushome.com.au/terrybrown/Media/Casting/Assab1.jpg>

5.2 O fator tempo de tratamento térmico

O tempo necessário à execução de um tratamento térmico depende das dimensões da peça que receberá o tratamento, pois quanto maior a peça, maior será o tempo necessário para aquecê-la e austenitizá-la (no caso dos aços) e da microestrutura desejada, tendo em vista que, para que haja modificação microestrutural, é preciso certo tempo de aquecimento, como se viu anteriormente nos diagramas TTT.

Vale ressaltar que, quanto maior o tempo de aquecimento e manutenção da temperatura da peça a ser tratada, maior a segurança da completa dissolução das fases para posterior transformação nos constituintes desejados e, igualmente, será maior o tamanho de grão da liga, porém, a utilização de tempos longos de tratamento térmico facilita a oxidação da peça, e a granulação grosseira normalmente é prejudicial.

É importante salientar que o tempo total de austenitização (necessário à execução do tratamento térmico) será dado pelo tempo, para que se aqueça completamente a peça a ser tratada, somado com o tempo de permanência na temperatura de transformação (**tempo de encharque ou tempo de permanência ou tempo de repouso**).

$$T_{\text{TOTAL}}(s) = T_{\text{AQUECIMENTO}}(s) + T_{\text{ENCHARQUE}}(s)$$

O tempo de aquecimento depende, basicamente, de três fatores: do poder calorífico do forno, do formato e dimensões da peça a ser tratada e da distribuição do aquecimento na peça, durante o tratamento.

O tempo de repouso depende da velocidade do processo que vai transformar as fases cristalinas e da temperatura de austenitização.

Para escolher, na prática, o tempo total de austenitização, é preciso se utilizarem métodos práticos já definidos, ou calcular este tempo.

5.2.1 Cálculo do tempo total de austenitização

O procedimento de cálculo do tempo total de austenitização pode ser resumido nas etapas a seguir demonstradas.

1ª Etapa – verificar o perfil geométrico da peça, ou seja, se a mesma é uma lâmina, um paralelepípedo, um cilindro ou uma esfera, conforme ilustração da Figura 5.1 e adotar, para fins de cálculo a menor dimensão da peça.

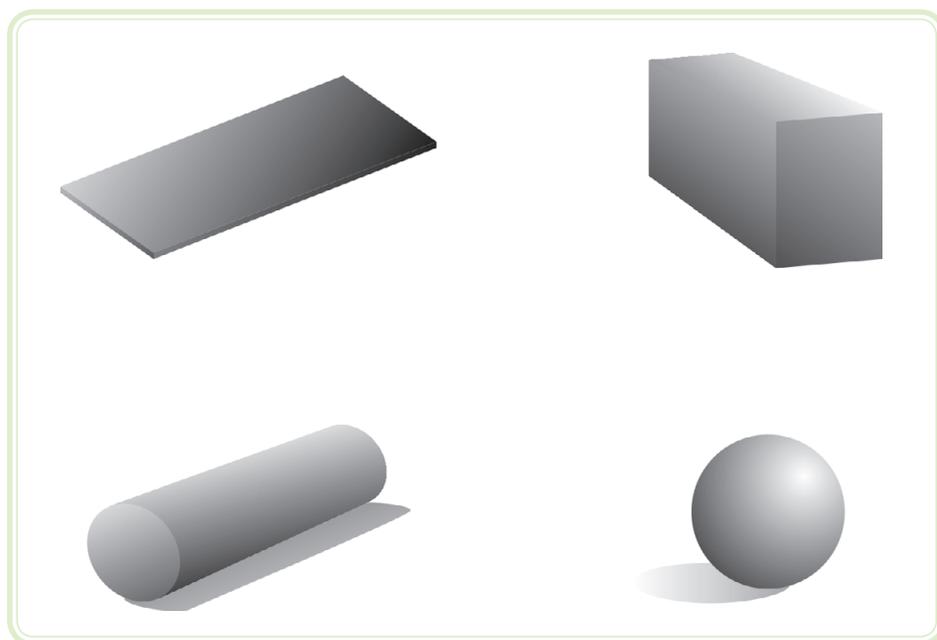


Figura 5.1: Formas principais de peças a serem tratadas termicamente

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2007

2ª Etapa – adotar, como tempo de encharque um dos seguintes valores:

$T_{\text{ENCHARQUE}} = 2$ minutos a cada milímetro de espessura, para o aço-carbono.

$T_{\text{ENCHARQUE}} = 3$ minutos a cada milímetro de espessura, para os aços-liga.

$T_{\text{ENCHARQUE}} = 0$ minuto, se a peça for muito grande.

$T_{\text{ENCHARQUE}} = 0$ minuto, se a peça for muito pequena, com diâmetro ou espessura muito menor do que 1 milímetro.

O tempo de encharque será nulo nessas duas situações, pois, como o tempo de aquecimento da peça será demasiadamente grande para peças muito espessas, o tempo total de permanência no forno será praticamente o tempo de aquecimento, pois ele será bem longo quando comparado ao tempo de permanência (encharque). Já para peças muito pequenas e/ou de espessura fina, o tempo de encharque será nulo, pois apesar de o tempo de aquecimento ser menor, todo o material transformar-se-á de maneira homogênea em virtude dessa espessura pequena.

3ª Etapa – calcular o tempo de aquecimento conforme expressão a seguir:

$$T_{\text{AQUECIMENTO}} = 0,1 \cdot D_1 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \text{ (minutos)}$$

Sendo:

D_1 = características dimensionais (menor dimensão da peça, em mm).

Para uma lâmina ou chapa – D_1 será constituída pela espessura (menor dimensão).

Para um cilindro – D_1 será o valor mínimo entre o diâmetro e a espessura.

K_1 é o coeficiente do forno e valerá 1 para os sais, 2 para os meios gasosos e 0,5 para os metais fundidos.

K_2 é coeficiente que dá forma as peça, sendo 1 para esféricas, 2 para cilíndricas, 2,5 para paralelepípedos e 4 para lâminas.

K_3 é o coeficiente de regularidade de aquecimento da peça no forno, sendo 1 para aquecimento em todos os lados, 1,5 para todas as faces menos a repousada no forno e 4 para um só dos lados a ser aquecido.

4ª Etapa – somar os tempos calculados para obter o tempo total em segundos. Assim, obter-se-á o tempo total necessário para austenitização do aço para posterior conclusão do tratamento térmico com o tipo e a forma de resfriamento a serem escolhidos.

5.3 O fator velocidade de resfriamento

Calculado o tempo total de aquecimento, deve-se agora obter a velocidade de resfriamento a ser empregada em um tratamento térmico que depende do tipo de material e da transformação de fase ou microestrutura desejada após o término do tratamento.

Essa variável é a mais importante dentre as citadas anteriormente, pois é ela que efetivamente determinará a microestrutura da liga tratada, além da definição dos constituintes microestruturais do material ao término do resfriamento.

5.3.1 Principais meios de resfriamento

Um meio de resfriamento é o ambiente no qual a peça será resfriada, após o aquecimento e permanência a uma determinada temperatura (**encharque**). Esse ambiente influenciará a velocidade em que o calor será retirado do material, interferindo em sua microestrutura, tamanho de grão e constituintes finais da liga.

Um parâmetro que define a velocidade com que o meio retira calor do material é a **severidade**. Quanto maior for esse fator, maior será a velocidade de resfriamento do material. Alguns valores de severidade e os principais meios de resfriamento são apresentados a seguir, na Tabela 5.1. Esse parâmetro é definido pelo tipo de material e pelo grau de agitação da peça no referido meio.

Tabela 5.1: Severidade para os tratamentos térmicos sob agitação em função do meio de resfriamento

Grau de agitação	Ambiente do forno				
	Ar (25°C)	Óleo mineral (25 – 200°C)	Água (25°C)	Solução aquosa de NaOH a 50%	Solução aquosa de NaCl a 10%
Estacionário	0,02	0,25 – 0,30	0,9 – 1,0	2,0	3,0
Fraco	–	0,30 – 0,35	1,0 – 1,1	2,0 – 2,2	3,0 – 3,3
Moderado	–	0,35 – 0,40	1,2 – 1,3	–	–
Bom	–	0,40 – 0,50	1,4 – 1,5	–	–
Forte	–	0,50 – 0,80	1,6 – 2,0	–	–
Elevado	0,08	0,80 – 1,10	4,0	5,0	7,5

Fonte: Adaptado de Chiaverini, 2004

5.3.2 Como escolher o meio de resfriamento?

A decisão do meio de resfriamento de um tratamento térmico é um compromisso entre os seguintes fatores:

- Obtenção das características finais desejadas (microestruturas e propriedades mecânico-metalúrgicas).
- Ausência de aparecimento de fissuras e empenamento na peça.
- Ausência de geração de grande concentração de tensões.
- Conhecimento do diagrama da liga em estudo.
- Conhecimento do ambiente e das variáveis envolvidas.
- Propriedades mecânicas e estruturais dos materiais.

A seguir, na Figura 5.2, são mostradas curvas de resfriamento contínuo (“A”, “B”, “C”, “D” e “E”) contendo um registro da queda de temperatura de um aço eutetoide para diferentes meios de resfriamento adotados.

Pode-se observar dessa figura que o comportamento do material, sujeito a velocidades de arrefecimento diferentes, produzirá constituintes finais distintos.

Para a curva “A”, o aço eutetoide sofreu um resfriamento lento, dentro do próprio forno, saindo de uma temperatura acima da eutetoide (727°C) e arrefecendo-se até 25°C (temperatura ambiente) em um tempo de 10^5 segundos (aproximadamente 27 horas e 47 minutos). Nessas condições, diz-se que o material sofreu um **recozimento pleno** e sua estrutura austenítica transforma-se completamente em perlita grosseira, o que será mais bem explicado no item específico sobre recozimento pleno.

Na curva “B”, verifica-se um resfriamento mais rápido do aço, que, partindo de uma temperatura acima de 727°C, foi resfriado ao ar livre e levou 7×10^3 segundos (cerca de 10 minutos e 40 segundos) para alcançar a temperatura ambiente. Nesses termos, a peça passou por tratamento térmico de **normalização**, passando sua estrutura austenítica para perlita fina, o que será mais detalhado quando o assunto normalização for abordado.

Analisando-se o comportamento da curva “C”, percebe-se que o aço foi resfriado em um meio mais severo (óleo de têmpera) por cerca de 100 segundos, passando de uma estrutura austenítica para uma composição formada pelos constituintes perlita, bainita e martensita.

Pode-se ainda verificar, nessa figura, que um meio mais severo (água) é utilizado no tratamento térmico de têmpera, para resfriar a amostra em cerca de 5 segundos, gerando, como constituinte final, a martensita (curva "D").

Na curva "E", observa-se um limiar para a formação da perlita. Essa velocidade de resfriamento é conhecida como crítica, pois, a partir dela, a perlita não mais se formará, passando o aço a ter como constituintes finais a bainita e a martensita para um tempo de resfriamento de aproximadamente 15 segundos.

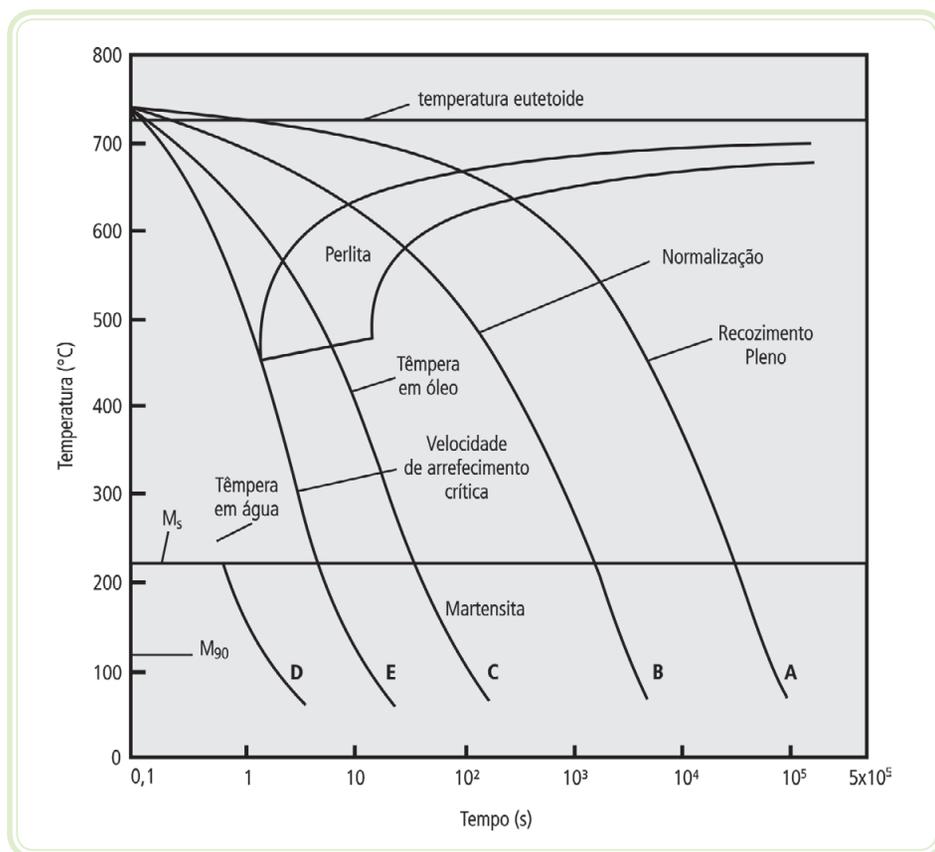


Figura 5.2: Influência do meio de resfriamento no tratamento térmico do aço eutetoide
Fonte: Adaptado de Callister, 2002

5.4 O fator atmosfera de tratamento térmico

A atmosfera é uma variável importante a ser escolhida para a correta execução de um tratamento térmico.

A utilização de um meio gasoso ou líquido de maneira adequada poderá evitar a oxidação da liga metálica durante a execução do tratamento térmico, ou impedir a perda de algum elemento químico importante, como o carbono no aço, o que pode gerar descarbonetação com perda de algumas propriedades mecânicas e metalúrgicas como dureza e resistência à tração, por exemplo.

Resumo

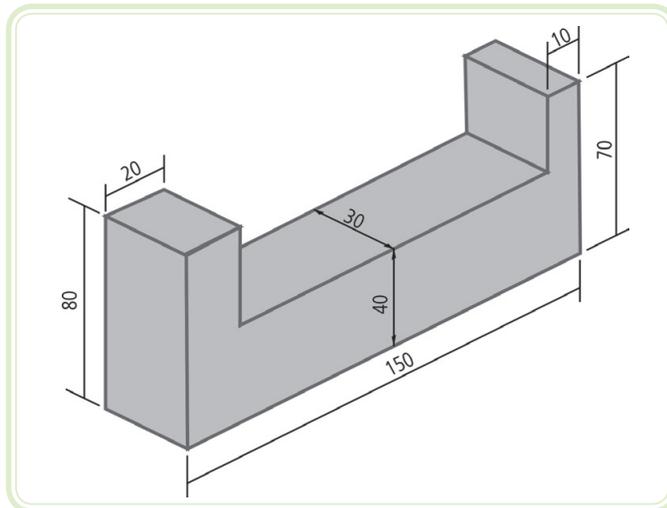
Nessa aula, foram vistos os principais fatores que influenciam em um tratamento térmico, suas características e como eles atuam no comportamento de um processo de aquecimento e resfriamento de materiais.

Apresentou-se o cálculo do tempo de austenitização, necessário para realizar um tratamento térmico.



Atividades de aprendizagem

1. Quais os principais fatores de influência nos tratamentos térmicos?
2. O que é severidade? Responda ainda quais os principais meios de resfriamento aplicados em tratamentos térmicos.
3. Calcule.



Exercício 3.1: Modelo de peça a ser tratada termicamente (dimensões em mm)

Fonte: Oliveira, 2007

Calcular o tempo total de aquecimento para se executar o tratamento térmico de têmpera de um aço carbono em forno com atmosfera gasosa e com aquecimento realizado em todos os lados da peça, menos a face repousada no forno.

A seção máxima transversal ao longo da peça é a de 30 mm x 40 mm, logo, a menor dimensão a ser adotada (D_1) será de 30 mm. K_1 valerá 2, pois o meio de aquecimento do forno é gasoso. O valor de K_2 será 2,5, pois a peça possui a forma de um paralelepípedo e K_3 terá o valor 1,5, pois todos os lados serão aquecidos, menos a face repousada no forno. Logo:

$$T_{\text{AQUECIMENTO}} = \text{_____ minutos}$$

Sendo o tempo necessário para a completa austenitização do aço carbono (tempo de encharque) estimado em 2 minutos para cada milímetro de espessura obtém-se:

$$T_{\text{ENCHARQUE}} = \frac{\text{minutos}}{\text{mm}} \cdot \text{_____ mm} = \text{_____ minutos}$$

E, por conseguinte:

$$T_{\text{TOTAL}}(s) = T_{\text{AQUECIMENTO}}(s) + T_{\text{ENCHARQUE}}(s)$$

$$T_{\text{TOTAL}} = \text{_____ minutos}$$

Aula 6 – Tratamentos térmicos (princípios, características e aplicações)

Objetivos

Apresentar os princípios dos tratamentos térmicos de recozimento, normalização, têmpera e revenimento, identificando suas características e aplicações práticas.

Conhecer os tratamentos térmicos de aços com processos isotérmicos do tipo martêmpera e austêmpera, distinguindo suas particularidades e aplicações industriais.

Descrever as propriedades de endurecimento ou temperabilidade e suas aplicações práticas.

6.1 Classificação inicial

Os tratamentos térmicos vistos de forma preliminar nos itens anteriores, são caracterizados pela temperatura em que eles ocorrerão, o tempo de exposição às altas temperaturas, a velocidade e forma de resfriamento e a atmosfera onde se executará tal procedimento.

Baseado nos parâmetros citados no item anterior e na finalidade da cada operação de tratamento térmico a ser realizada em uma liga metálica, definem-se vários tipos de tratamentos térmicos diferentes.

Na Figura 6.1, mostra-se um resumo dos principais tratamentos térmicos existentes na atualidade. Há inúmeras vertentes deles em função da combinação de vários gases, sais e outros elementos aplicados durante o tratamento de metais e ligas metálicas.

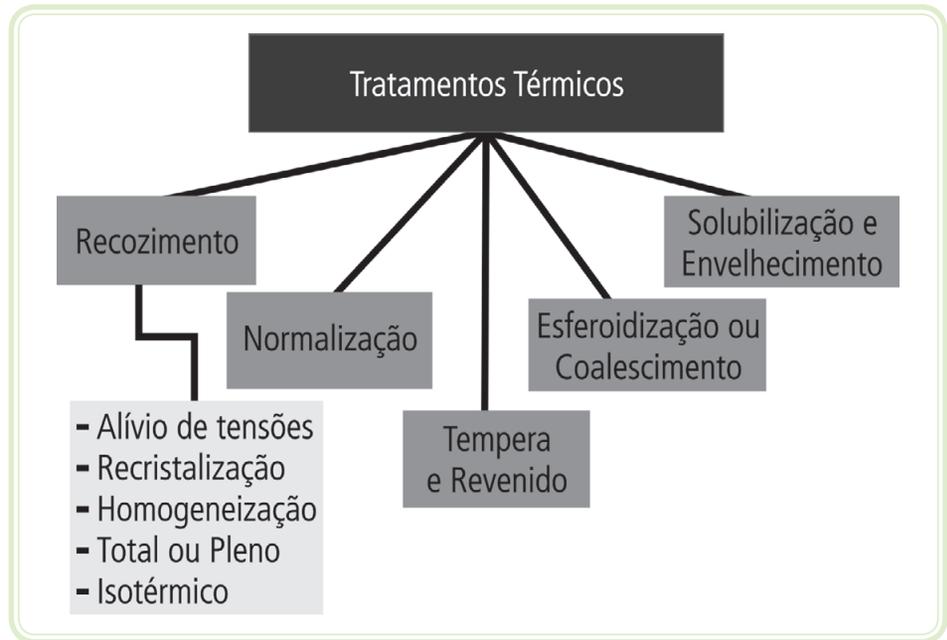


Figura 6.1: Resumo dos tratamentos térmicos a serem estudados

Fonte: Costa, 2003

Na Figura 6.2, ilustram-se as formas de resfriamento e os constituintes formados em alguns tratamentos térmicos do aço-carbono eutetoide e, na Figura 6.3 as curvas de resfriamento aplicadas aos tratamentos térmicos de recozimento pleno, recozimento isotérmico, normalização e têmpera seguida de revenimento para esse mesmo aço.

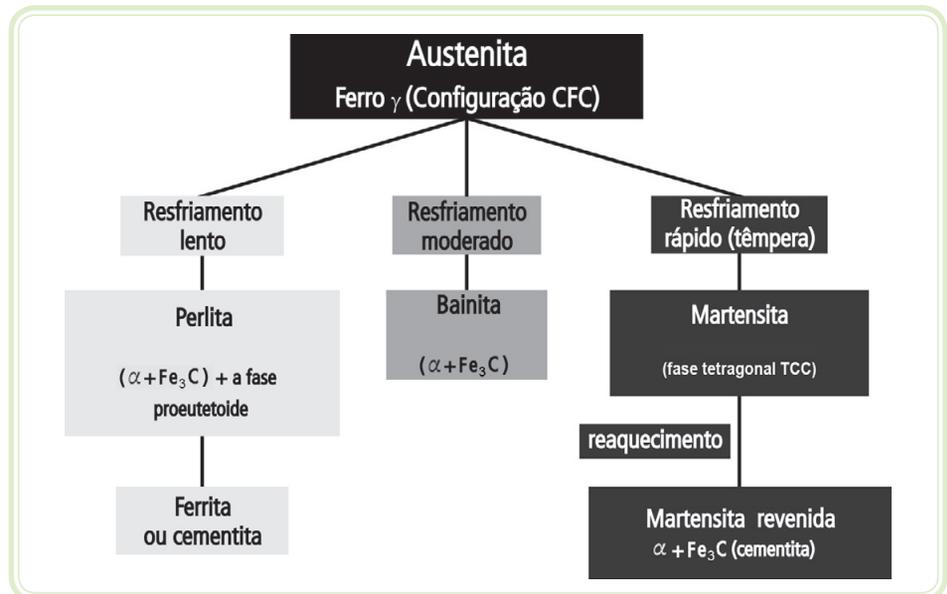


Figura 6.2: Resumo dos tratamentos térmicos de recozimento pleno (à esquerda), normalização (ao centro) e têmpera seguida de revenimento (à direita) de um aço-carbono

Fonte: Adaptado de Callister, 2002

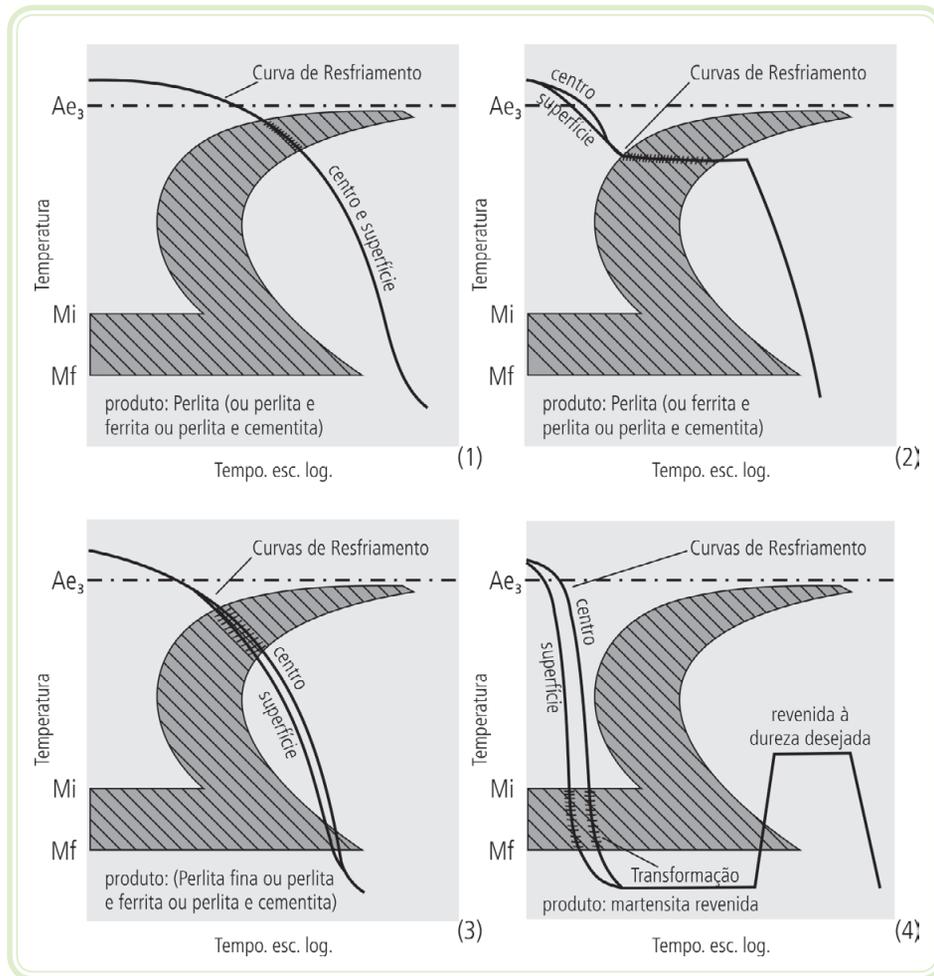


Figura 6.3: Curvas TTT dos tratamentos de recozimento pleno (1), recozimento isotérmico (2), normalização (3) e têmpera seguida de revenimento (4) para um aço-carbono eutetoide

Fonte: Costa, 2003

6.2 Tratamentos térmicos de recozimento

Os tratamentos térmicos de recozimento, conforme o diagrama da Figura 6.1, são divididos em alívio de tensões ou subcrítico, recozimento para recristalização, recozimento para homogeneização, recozimento total ou pleno, recozimento isotérmico ou cíclico e esferoidização ou coalescimento. Os recozimentos para alívio de tensões e para recristalização são aplicados a qualquer liga metálica. O recozimento para homogeneização é indicado para peças fundidas. O recozimento total ou pleno e o recozimento isotérmico ou cíclico são indicados para os aços em geral.

O que diferencia cada um desses tratamentos térmicos de recozimento é o produto formado e a aplicação prática do material tratado (se vai necessitar de maior resistência mecânica ou melhor usinabilidade). Com isso, definem-se

temperaturas de aquecimento, formas de aquecimento, meios e tipos de resfriamento diferentes, adequados a cada tipo de resultado esperado. São tipos de recozimento mais utilizados em ligas metálicas:

6.2.1 Recozimento pleno

O tratamento térmico de recozimento pleno possui as seguintes características:

6.2.1.1 Constituintes estruturais resultantes para aços

- Hipoeutetoide → ferrita + perlita grosseira.
- Eutetoide → perlita grosseira.
- Hipereutetoide → cementita + perlita grosseira.

Observação

A perlita grosseira é ideal para melhorar a usinabilidade dos aços de baixo e médio-carbono, facilitando operações de corte destas ligas. Para melhorar a usinabilidade dos aços com alto-carbono recomenda-se a esferoidização.

6.2.1.2 Objetivos do recozimento pleno

- Regularizar a estrutura bruta de fusão, possibilitando maior homogeneidade aos materiais fundidos.
- Remover tensões internas e a regularização das estruturas de materiais devido às operações de conformação mecânica a frio e a quente, como estampagens, dobramentos, trefilações, cortes e soldas, minimizando ou eliminando tensões existentes.
- Regularizar a estrutura proveniente de tratamentos térmicos anteriores.
- Remover tensões devidas a irregularidades no resfriamento de diferentes partes de peças.
- Eliminar impurezas gasosas.
- Tornar o material mais dúctil, mole e tenaz (energia absorvida para o rompimento aumenta).

- Diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade das ligas.
- Alterar as propriedades mecânicas como a resistência mecânica (resistência à tração) e ductilidade.
- Ajustar o tamanho de grão.
- Melhorar as propriedades elétricas e magnéticas.
- Produzir uma microestrutura definida.
- Obter dureza e estrutura controlada para os aços.

6.2.1.3 Método

O tratamento térmico de recozimento pleno é iniciado a partir do levantamento de informações da liga a ser trabalhada, tais como o seu diagrama TTT, o histórico da peça, (conformações mecânicas, tratamentos térmicos anteriores, etc.) e os produtos desejáveis após tratamento.

Definem-se as temperaturas de aquecimento do material acima da zona crítica, ou acima da curva A_1 (dependendo da composição química do aço) necessárias à austenitização total da peça, mantendo-se a liga nessa temperatura para homogeneização completa da amostra, com os tempos de aquecimento e encharque (tempo total de aquecimento) calculados conforme exemplo da aula 5, aplicando-se às variáveis de interesse os valores necessários à correta execução do recozimento. Outra variável que deve ser ajustada, de acordo com o resultado desejado, é o ambiente do forno.

Após ser alcançado o tempo total de aquecimento da peça, deve-se resfriá-la lentamente, preferencialmente dentro do forno. Quanto menor for o teor de carbono do aço, mais rapidamente poderá ser efetuado o resfriamento da peça, utilizando-se resfriamento em areia, cinza ou cal, ou ainda em ar ambiente estático (sem correntes de vento). A velocidade de resfriamento é de aproximadamente 25°C por hora.

O resfriamento nesse processo é demasiado lento (dentro do forno) o que implica um tempo longo de processo (desvantagem produtiva).

Há cuidados que devem ser tomados na execução do recozimento pleno. São eles:

- Controlar o tempo de aquecimento da peça.
- Controle de tempo e temperatura de tratamento térmico.
- O correto apoio das peças dentro do forno.
- Controle da atmosfera do forno.

As principais aplicações do tratamento térmico de recozimento pleno ocorrem nas peças fundidas e encruadas.

A temperatura de tratamento térmico (aquecimento) recomendada para os aços hipoeutetoides é de 50°C acima da linha A_3 e para os hipereutetoides entre as linhas A_{cm} e A_1 . A Figura 6.3 (curva 1) apresenta o diagrama de resfriamento contínuo típico para um aço-carbono eutetoide que passou por um recozimento pleno.

6.2.2 Recozimento para alívio de tensões ou recozimento subcrítico

6.2.2.1 Objetivo

- A remoção de tensões internas originadas de processos (tratamentos mecânicos, soldagem, corte, etc.).

6.2.2.2 Temperatura

- A temperatura a ser alcançada deve ser tal que não provoque nenhuma transformação de fase.
- Deve-se trabalhar abaixo da temperatura crítica dos aços.
- As temperaturas de trabalho devem se localizar abaixo da linha A_1 , onde não se verifica transformação dos constituintes do aço (entre 550 e 700°C).

6.2.2.3 Resfriamento

- Lento (ao ar ou ao forno).

Devem-se evitar velocidades de resfriamento muito elevadas devido ao risco de distorções.

6.2.3 Recozimento para recristalização

6.2.3.1 Objetivo

- Eliminar o encruamento gerado pela deformação a frio. Deve apresentar um mínimo de encruamento e ser aquecido à temperatura adequada.

6.2.3.2 Temperatura

- A temperatura a ser alcançada deve ser tal que não provoque nenhuma transformação de fase.

6.2.3.3 Resfriamento

- Lento (ao ar ou ao forno).

6.2.4 Recozimento para homogeneização

6.2.4.1 Objetivo

- Melhorar a homogeneidade da microestrutura de peças fundidas.

6.2.4.2 Temperatura

- É realizado em temperaturas acima das verificadas no tratamento térmico de recozimento pleno.

6.2.4.3 Resfriamento

- Lento (ao ar ou ao forno).

6.2.5 Recozimento isotérmico ou cíclico

6.2.5.1 Objetivos

- Melhorar a homogeneidade da microestrutura de peças confeccionadas geralmente em aço.
- Tornar o resfriamento bem mais rápido do que no resfriamento pleno, tornando-o mais prático e mais econômico.
- Permitir a obtenção de uma estrutura final mais homogênea.

6.2.5.2 Temperatura

- A temperatura de tratamento térmico (aquecimento) recomendada para os aços hipoeutetoides é de 50°C acima da linha A_3 e para os hipereutetoides entre as linhas A_{cm} e A_1 .

6.2.5.3 Resfriamento

- Esse tratamento é geralmente executado em banho de sais fundidos (severidade baixa), retirando-se a peça do forno e mantendo-a no banho até a completa transformação.

Não é aplicável para peças de grande volume porque é difícil de baixar a temperatura do núcleo da mesma forma que na superfície.

6.3 Esferoidização ou coalescimento

6.3.1 Objetivos

- Produzir uma estrutura globular ou esferoidal de carbonetos no aço (esferoidita).
- Melhorar a usinabilidade, em geral de aços com alto teor de carbono.
- Facilitar a deformação a frio.

6.3.2 Método

- O aquecimento da peça é feito por tempo prolongado a uma temperatura logo abaixo da linha inferior da zona crítica.

- Como alternativa, a esferoidização pode ser executada com aquecimentos e resfriamentos alternados entre temperaturas que estão logo acima e logo abaixo da linha inferior de transformação.

Na Figura 6.4 pode-se ver a curva de aquecimento, permanência e resfriamento de um aço-carbono hipereutetoide, sendo a linha cheia, em verde, representativa da esferoidização convencional (temperatura logo acima de A_1) e a linha pontilhada em verde exemplo de um coalescimento alternativo (temperatura logo acima e logo abaixo de A_1).

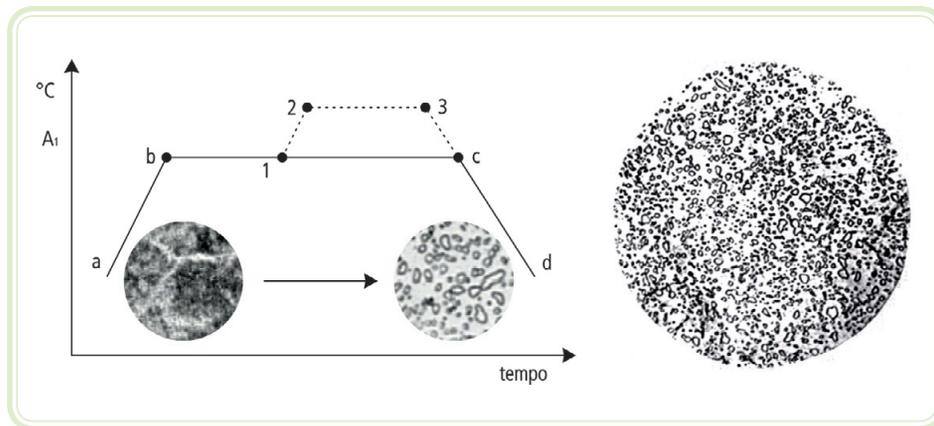


Figura 6.4: Esferoidização ou coalescimento de um aço-carbono hipereutetoide e o constituinte formado – esferoidita (à esquerda)

Fonte: Oliveira, 2007

Na Figura 6.5 podem-se ver algumas das faixas recomendadas para os tratamentos térmicos de recozimento mencionados anteriormente, para os aços-carbono.

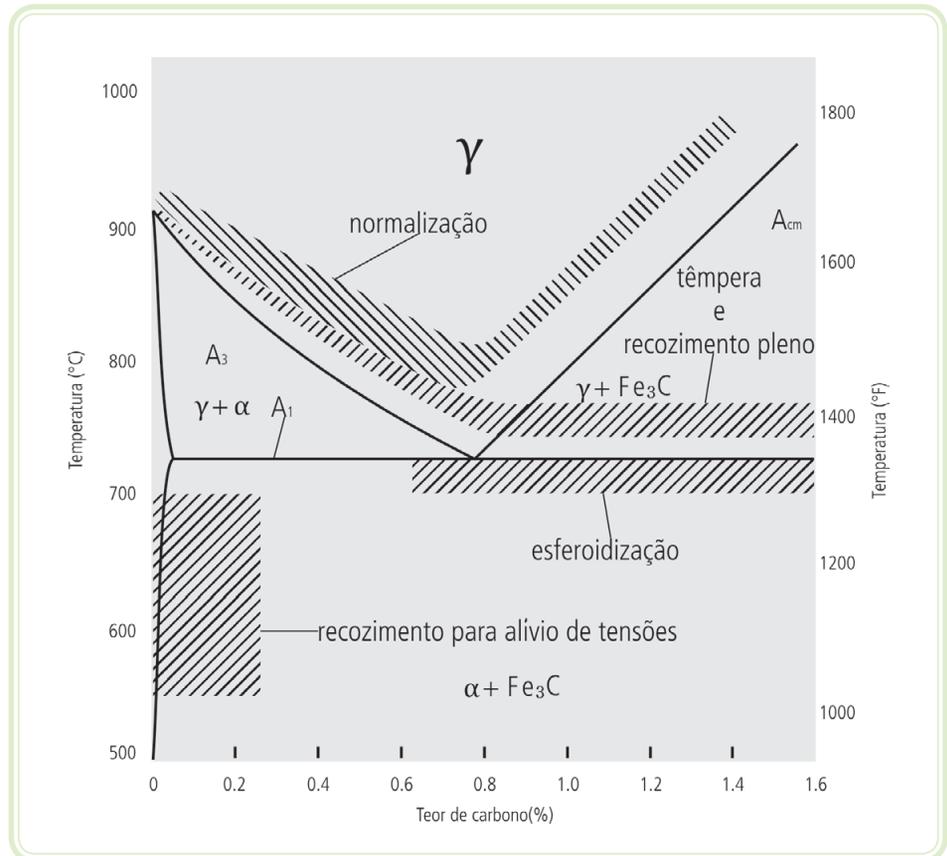


Figura 6.5: Faixas de temperaturas usuais de alguns tratamentos térmicos de aços
 Fonte: Oliveira, 2007

6.4 Normalização

6.4.1 Objetivos

- Uniformizar e refinar a granulação dos aços.
- Melhorar a uniformidade da microestrutura.

É frequentemente usada antes da têmpera e revenimento.

Na normalização, é obtida uma melhor homogeneização das microestruturas resultantes do que no recozimento pleno, pois a temperatura de tratamento é mais alta. A granulação mais fina é conseguida no resfriamento mais rápido.

6.4.2 Método

- Aquecimento de um aço a temperaturas acima da sua zona crítica, mantendo-o nessa temperatura para completa homogeneização com posterior resfriamento ao ar.

6.4.3 Aplicações

- Peças fundidas e/ou forjadas.
- Peças de grandes dimensões.

6.4.4 Temperatura

- Aços hipoeutetoides – acima da linha A_3 .
- Aços hipereutetoides – acima da linha A_{cm}^* .

* Não há formação de um invólucro de carbonetos frágeis em função da velocidade de resfriamento ser maior, o que gera grãos menores e mais homogêneos.

6.4.5 Resfriamento

- Ao ar (calmo ou forçado).

6.4.6 Constituintes estruturais resultantes

- Hipoeutetoide → ferrita + perlita fina.
- Eutetoide → perlita fina.
- Hipereutetoide → cementita + perlita fina.

Observação

Conforme o aço pode-se obter bainita.

Em relação ao recozimento a microestrutura é mais fina, apresenta menor quantidade e melhor distribuição de carbonetos, o que é demonstrado nas Figuras 6.7 e 6.8.

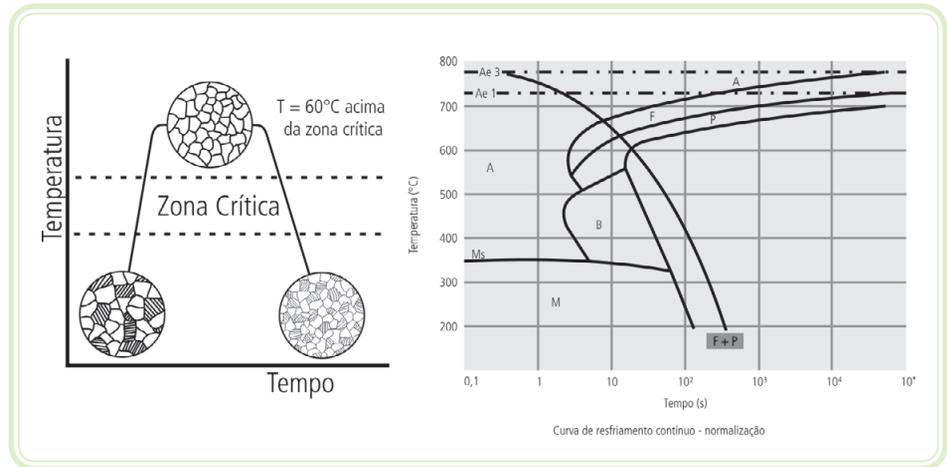


Figura 6.6: Representação das curvas de aquecimento e resfriamento contínuo de normalização de um aço-carbono hipoeutetoide

Fonte: Oliveira, 2007

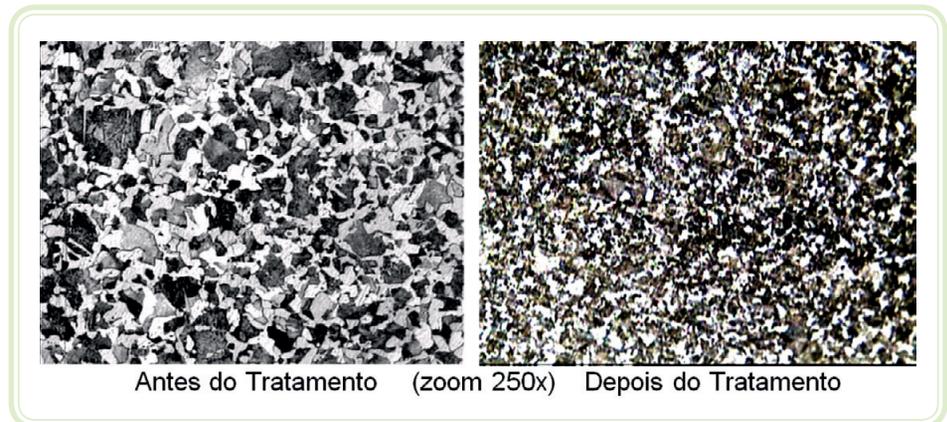


Figura 6.7: Microestrutura de um aço 1045 (0,45% C) antes e depois da normalização

Fonte: Oliveira, 2007

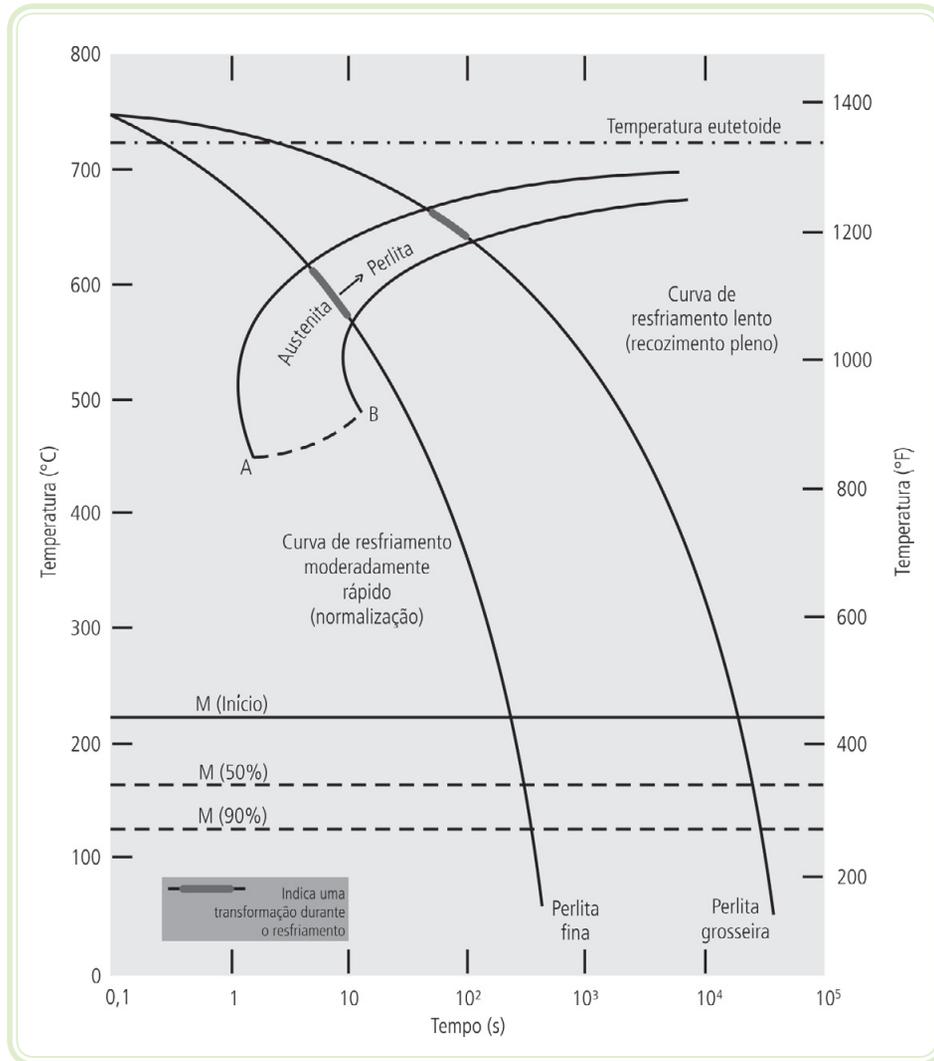


Figura 6.8: Comparação entre as curvas de resfriamento contínuo de um aço-carbono eutetoide

Fonte: Callister, 2002

6.5 Têmpera

6.5.1 Objetivos

- Obter a martensita (constituente metaestável endurecido do aço-carbono).
- Melhorar a resistência ao desgaste do aço.

6.5.2 Método

- Aquecimento de um aço a temperaturas acima da sua zona crítica, mantendo-o nessa temperatura para completa homogeneização com posterior resfriamento em meios severos, como água ou óleo de têmpera.

6.5.3 Aplicações

- Peças de aço com baixo ou médio teor de carbono, excepcionalmente com teor elevado desse elemento.

6.5.4 Temperatura

- A temperatura de tratamento térmico (aquecimento) recomendada para os aços hipoeutetoides é de 50°C acima da linha A_3 e para os hipereutetoides entre as linhas A_{cm} e A_1 . Aços hipoeutetoides – acima da linha A_3 .

6.5.5 Meios de resfriamento

Depende muito da composição do aço (% de carbono e elementos de liga) e da espessura da peça (utiliza-se água, salmoura, óleo).

Na Figura 6.9 apresenta-se um aço temperado em óleo de têmpera apresentando microestrutura bem definida e não muito grosseira, em virtude de a severidade do resfriamento ser moderada.

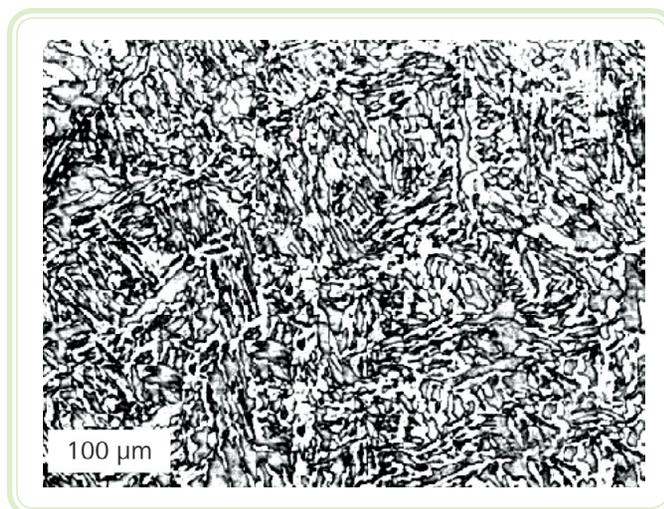


Figura 6.9: Microestrutura de aço temperado em óleo demonstrando ferrita em branco e a martensita (agulhas escuras)

Fonte: <http://www.cienciadosemateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=13&top=279>

Já na Figura 6.10, pode-se visualizar a microestrutura de um aço duro, resfriado em água. Nesse caso, em virtude de a severidade do meio de resfriamento ser mais elevada, cerca de três vezes maior do que óleo de têmpera, a martensita obtida será mais acicular (agulhas mais bem definidas) e mais grosseira, tendo em vista que o cisalhamento ocorrido foi mais intenso do que o registrado na Figura 6.9.



Figura 6.10: Microestrutura de aço duro temperado em água demonstrando as agulhas escuras de martensita em um fundo de austenita retida, que não se transformou durante o resfriamento brusco, em branco

Fonte: Callister, 2002

6.5.6 Temperabilidade

Capacidade de um aço adquirir dureza por têmpera a uma certa profundidade. Na Figura 6.11 está o exemplo comparativo da temperabilidade de vários aços com 0,4% de carbono. A curva que indica a queda de dureza em função da profundidade recebe o nome de **curva Jominy** que é obtida por meio de ensaios normalizados.

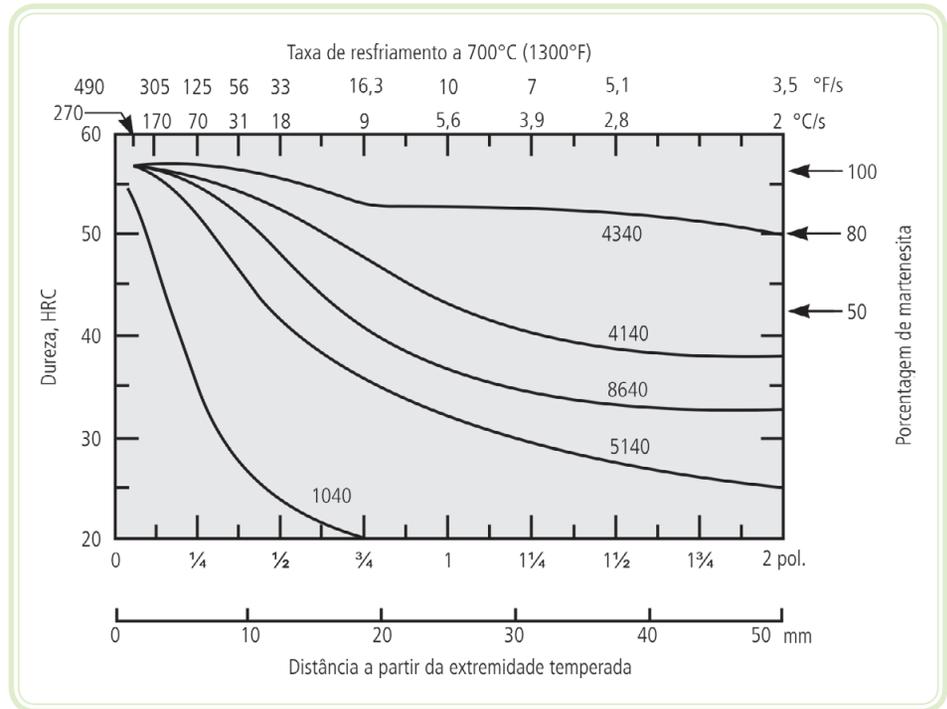


Figura 6.11: Temperabilidade de vários tipos de aços com 0,4% de carbono
 Fonte: Callister, 2002

6.5.7 Ensaio de temperabilidade Jominy

Consiste em temperar pela base, por meio de jato de água, em dispositivo apropriado, um corpo de prova-padrão; após o tratamento térmico, medições de dureza são realizadas ao longo do comprimento (verificando-se a diminuição da dureza longitudinal da peça, conforme se ilustra na Figura 6.12).

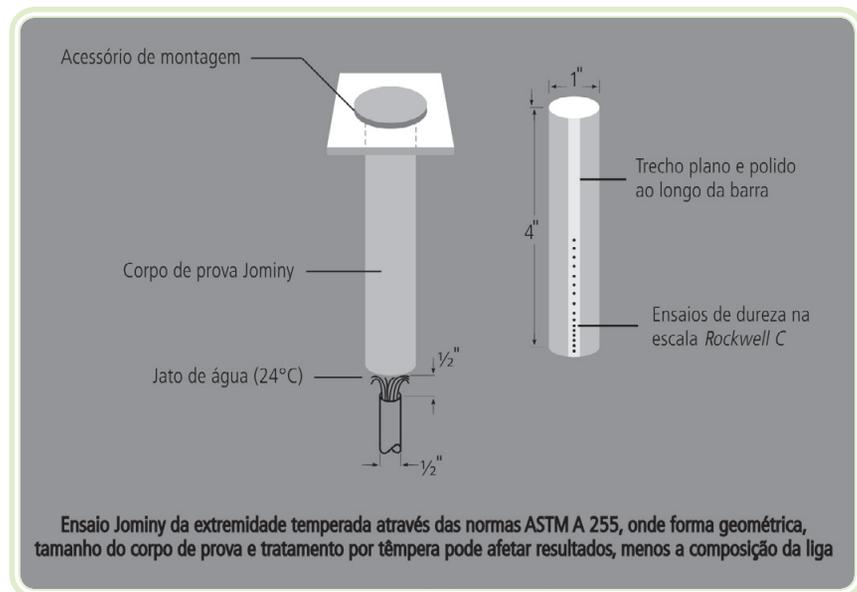


Figura 6.12: Ilustração do corpo de prova para ensaio de temperabilidade Jominy
 Fonte: Adaptado de Guy, 1978 apud Callister, 2002

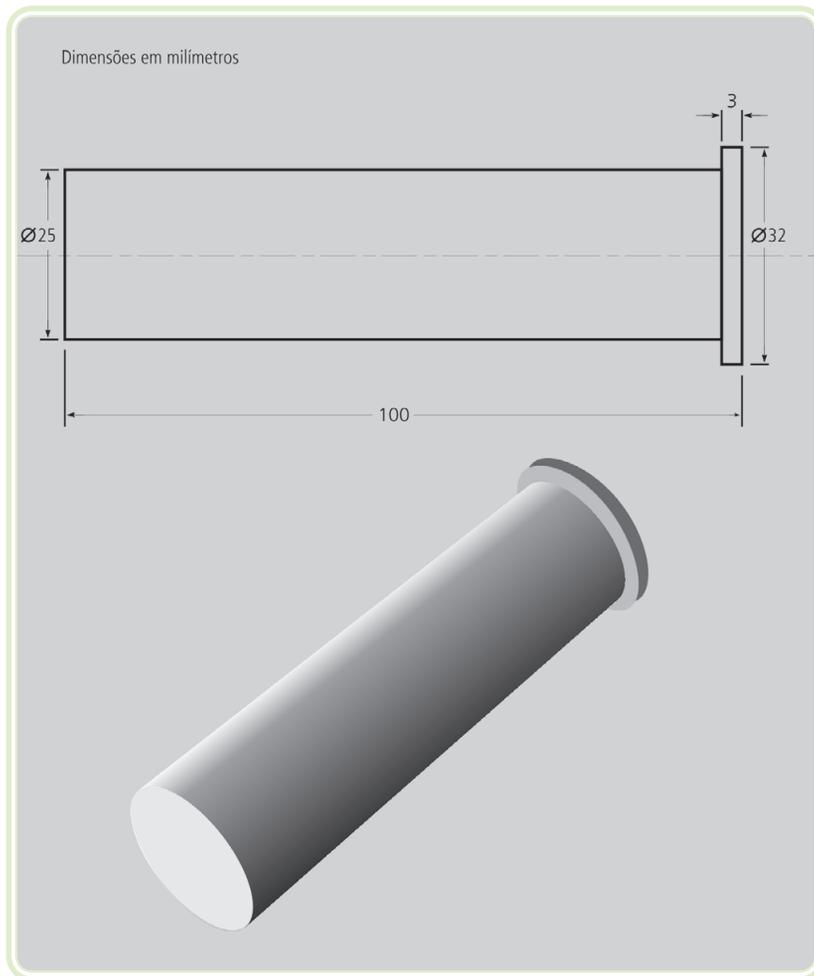


Figura 6.13: Dimensões típicas do corpo de prova para ensaio de temperabilidade Jominy
Fonte: Oliveira, 2007

6.6 Revenimento

O tratamento térmico de revenimento geralmente acompanha a têmpera.

6.6.1 Objetivos

- Aliviar ou remover as tensões adquiridas na têmpera.
- Corrigir a dureza e a fragilidade da peça, aumentando resistência, desgaste e tenacidade, minimizando os efeitos térmicos e mecânicos provocados pelo cisalhamento da estrutura austenitizada.

6.6.2 Método

- Consiste no tratamento térmico após a têmpera, a temperaturas inferiores às críticas, seguido de resfriamento lento, efetivando alívio de tensões.

6.6.3 Temperatura

- Pode ser escolhida de acordo com as combinações de propriedades desejadas.

Essa denominação se aplica genericamente a qualquer temperatura de revenido.

150 a 230°C – os carbonetos começam a precipitar.

Estrutura – martensita revenida (escura, preta).

Dureza – decresce de 65 RC para 60-63 RC.

230 a 400°C – os carbonetos continuam a precipitar em forma globular, invisíveis ao microscópio ótico.

Estrutura – perlita fina (Troostita).

Dureza – decai de 62 RC para 50 RC.

400 a 500°C – os carbonetos crescem em glóbulos, visíveis ao microscópio ótico.

Estrutura – sorbita.

Dureza – cai de 50 RC para 20-45 RC.

650 a 738°C – os carbonetos formam partículas globulares visíveis ao microscópio comum.

Estrutura – esferoidita.

Dureza – decai a valores abaixo de 20 RC.

Na Figura 6.14 podem-se ver os comportamentos da dureza e da resistência ao impacto de um aço-carbono hipoeutetoide quando submetido a diferentes temperaturas de revenimento.

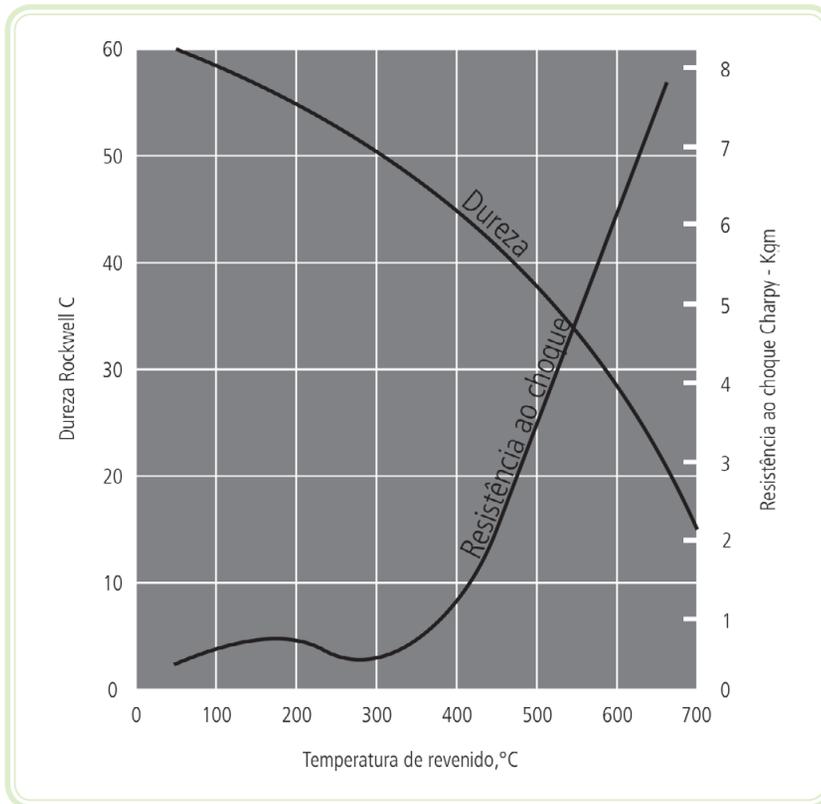


Figura 6.14: Comportamento da dureza e da resistência ao choque (obtida em ensaio Charpy) em função da temperatura de revenimento para um aço 1045 temperado

Fonte: Oliveira, 2007

6.6.4 Desvantagem

Alguns aços podem apresentar certa fragilidade após revenimento, principalmente quando a temperatura de tratamento é da ordem de 270°C.

- O primeiro tipo de fragilidade que se verifica é a denominada **Fragilidade Azul** que ocorre na faixa de temperatura de 230 a 370°C. Em algumas classes de aço há uma diminuição de tenacidade. Ocorre devido a uma rede de carbonetos precipitados que envolvem as agulhas de martensita. Este tipo de fragilidade é eliminado empregando aço com teor elevado de silício para inibir início da precipitação de carbonetos.
- Outro tipo de fragilidade verificado na faixa de temperatura de 375/400°C a 575/550°C é a **Fragilidade Krupp** ou reversível, que ocorre quando o aço é mantido por algum tempo ou resfriado lentamente nessa faixa de temperatura e está relacionado com presença de impurezas segregadas próximas ao contorno de grão na austenitização.

- A correção, em geral para esse tipo de problema ocorre com a aplicação de um novo revenimento ou por sub-resfriamento.

Na Figura 6.15 demonstram-se duas estruturas provenientes de um aço temperado (imagem da esquerda) com 200 vezes de ampliação, resultando em uma microestrutura composta de martensita (veios claros), de perlita fina ou troostita (contornos globulares escuros) e de temperado revenido (imagem da direita), com 1000 vezes de ampliação, resultando na sorbita.

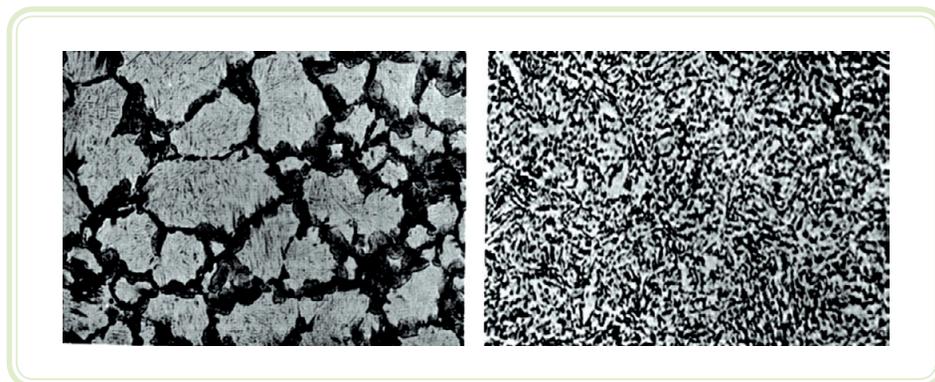


Figura 6.15: Microestruturas de um aço temperado (à esquerda) e temperado revenido (à direita)

Fonte: Oliveira, 2007

6.7 Tratamentos isotérmicos

Nos tratamentos isotérmicos verifica-se que as transformações de fase ocorrem a uma temperatura constante. Os dois tratamentos dessa natureza são a **austêmpera** e a **martêmpera**.

6.7.1 Austêmpera

Esse tratamento isotérmico é adequado a aços de alta temperabilidade, ou seja, àqueles com alto teor de carbono.

Nesse tratamento a peça é aquecida acima da zona crítica (temperatura superior a 800°C dependendo do teor de carbono), por certo tempo, até a completa austenitização, o que pode ser observado na posição 1 da Figura 6.16. A seguir, é resfriada bruscamente em banho de sais fundidos, com temperaturas na ordem de 260 a 440°C (posição 2 desta mesma figura), permanecendo nessa temperatura por um tempo, até que sejam cortadas as duas curvas TTT, ocorrendo transformação da austenita em bainita (posição 3). Em seguida a peça é resfriada ao ar livre (posição 4).

A dureza da bainita (constituente resultante da austêmpera) é de, aproximadamente, 50 HRC e a dureza da martensita é de 65 a 67 HRC.

Os aços que podem ser utilizados no processo pertencem às classificações que seguem:

- Aços-carbono com 0,5 a 1,0% C e com um mínimo de 0,6, % de Mn.
- Aços-carbono com mais de 0,9% C e pouco menos de 0,6 % de Mn.
- Aços-carbono com menos de 0,5% C e com 1,0 a 1,65 % de Mn.
- Alguns aços-liga com mais de 0,3% de carbono.

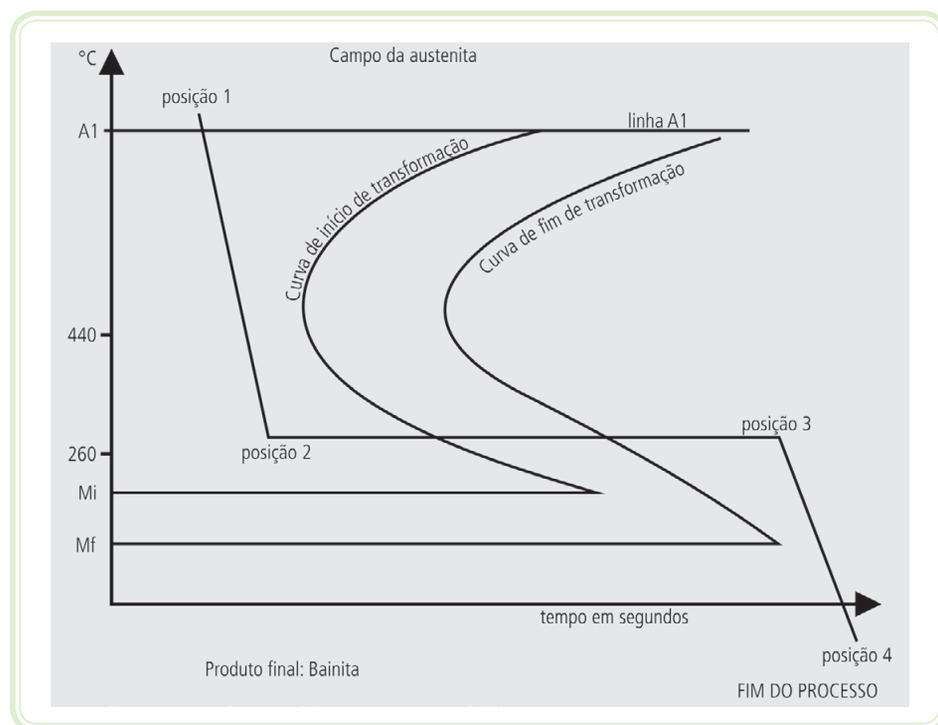


Figura 6.16: Curva de resfriamento da austêmpera de um aço com alto teor de carbono
Fonte: Oliveira, 2007

6.7.3 Martêmpera

A martêmpera ou têmpera interrompida é um tipo de tratamento isotérmico indicado para aços-liga. Esse tipo de processo reduz o risco de empenamento, trincas e tensões residuais das peças.

O processo é ilustrado no diagrama TTT na Figura 6.17.

A peça é aquecida acima da zona crítica para se obter a austenita (posição 1). Depois, é resfriada em duas etapas. Na primeira, a peça é mergulhada num banho de sal fundido ou óleo quente, com temperatura um pouco acima da linha M_i (posição 2). Mantém-se a peça nessa temperatura por certo tempo, tendo-se o cuidado de não cortar a primeira curva (posição 3). A segunda etapa é a do resfriamento final, ao ar, em temperatura ambiente (posição 4).

A martensita obtida apresenta-se uniforme e homogênea, diminuindo os riscos de trincas.

Após a martêmpera é necessário submeter a peça a revenimento.

Os ABNT são exemplos de aços que podem ser utilizados na martêmpera: 4130, 4140, 4150, 4340, 5140, 6150, 8640 e 52100.

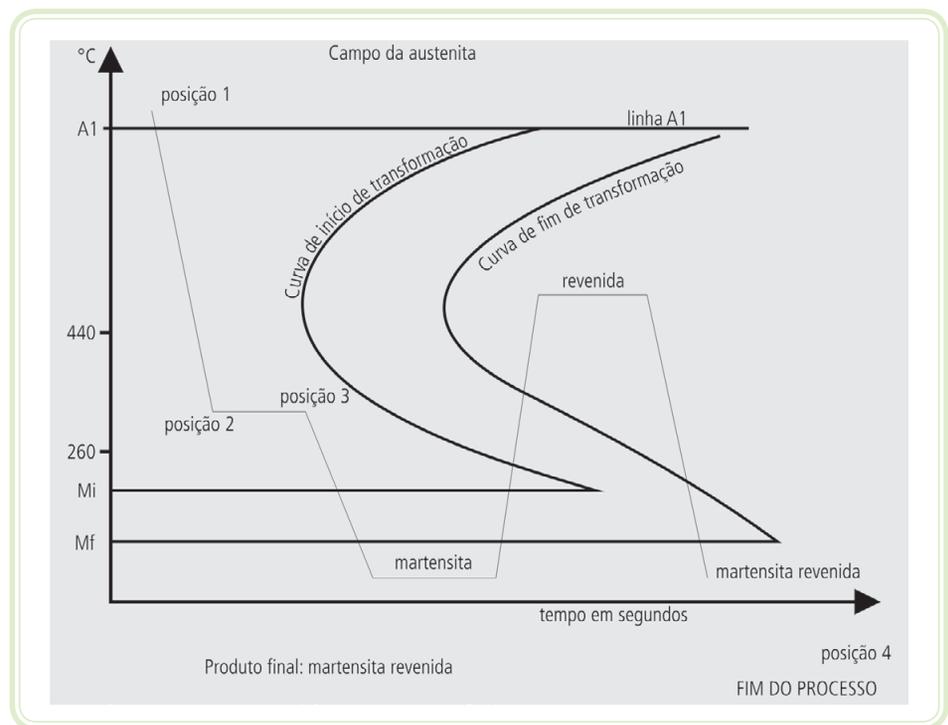


Figura 6.17: Curva de resfriamento da martêmpera de um aço com alto teor de carbono
Fonte: Oliveira, 2007

Resumo

Nesta aula, foram apresentados os princípios básicos e características principais dos tratamentos térmicos de recozimento, normalização, têmpera e revenimento, bem como suas aplicações práticas na indústria.

Apresentaram-se também os tratamentos isotérmicos de aços do tipo martêmpera e austêmpera, sendo distinguidas suas particularidades e aplicações industriais.

Foram descritas também as propriedades de endurecimento ou temperabilidade e suas aplicações práticas.

Atividades de aprendizagem



1. Descreva, resumidamente, os tratamentos térmicos de recozimento, normalização e têmpera.
2. O que é temperabilidade? Resuma, em poucas palavras, o ensaio aplicado para medir a temperabilidade de peças metálicas.
3. Quais as características do tratamento térmico de revenimento. Cite ainda uma de suas desvantagens.
4. O que é um tratamento isotérmico?
5. Cite as diferenças existentes entre os tratamentos isotérmicos de austêmpera e de martêmpera.

Aula 7 – Tratamentos térmicos superficiais

Objetivos

Conhecer os tratamentos térmicos aplicados na superfície de metais, suas aplicações e principais características.

7.1 Aplicações

Observe todas as engrenagens e acoplamentos mostrados na Figura 7.1 (**a** - acoplamento de engrenagens de dentes retos; **b** - coroa e pinhão; **c** - eixo sem fim; **d** - acoplamento de engrenagens de dentes helicoidais; **e** e **f** - caixa de marchas). Seus dentes sofrem grande desgaste e forte compressão necessitando, então, de dureza elevada e de alta resistência ao desgaste.



Figura 7.1: Diversas formas de aplicação de engrenagens

Fonte: (a) <http://static.hsw.com.br/gif/gear-spur.jpg>
(b) <http://static.hsw.com.br/gif/gear-helical1.jpg>
(c) <http://static.hsw.com.br/gif/gear-bevel.jpg>
(d) <http://static.hsw.com.br/gif/gear-worm.jpg>
(e) www.minisport.com/acatalog/Mini-Gearbox.jpg
(f) http://wikicars.org/images/en/thumb/c/c8/Gearbox_diagram.JPG/300px-gearbox_diagram.JPG

Se o núcleo dessas engrenagens não for tenaz e dúctil para suportar o esforço de impacto, eles poderão trincar.

Na têmpera total, o aço adquire dureza e resistência, ficando reduzidas sua ductilidade e tenacidade. Além disso, o aço apresenta tensões internas elevadas.

Para as aplicações mostradas é necessário endurecer apenas a superfície do aço, deixando seu núcleo dúctil e tenaz. Para isso, é preciso uma têmpera superficial.

7.2 Têmpera superficial por chama (*Flame Hardening*)

- O tratamento é aplicado, na maioria dos casos, a peças grandes ou de formato complexo que não podem ser temperadas em forno de câmara ou em banho de sal.
- Para melhores resultados faz-se antes a normalização, ficando a peça com granulação fina e homogênea.
- O aquecimento se faz com maçarico oxiacetilênico com chama semicarburante, ou seja, com leve excesso de acetileno.
- A temperatura deve ficar acima da zona crítica do material.
- Após o aquecimento, a peça é resfriada por jato d'água ou por imersão em óleo.
- A olho nu distinguem-se as duas regiões em estudo após polimento e ataque químico: a região temperada é escura e a não temperada é clara.
- Pode ser feita pelos métodos **estacionário**, **progressivo** ou **combinado**.

O **método estacionário** consiste em aplicar a chama na peça, até uma temperatura de cerca de 800°C. A chama move-se sobre a área que será endurecida. O resfriamento é imediato na água ou no óleo. O processo é manual.

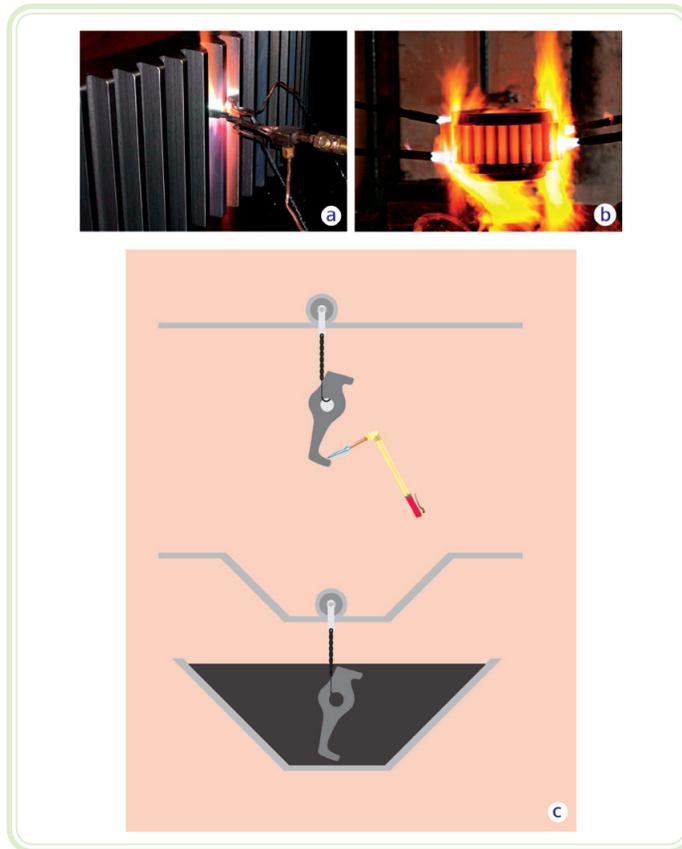


Figura 7.2: Têmpera superficial por chama no método estacionário com aquecimento (a e b) e esquema de aquecimento e resfriamento (c)

Fonte: (a) http://www.thermobondflame.com/_mndata/thermobond/thumbnails_large/156240.jpg
 (b) <http://authorityflame.com/Assets/2111-SpinGearHardening.jpg>
 (c) SENAI-SP, 1999

No **método progressivo**, a peça se move, e o maçarico permanece fixo. O resfriamento é feito logo após a chama ter aquecido a superfície da peça.

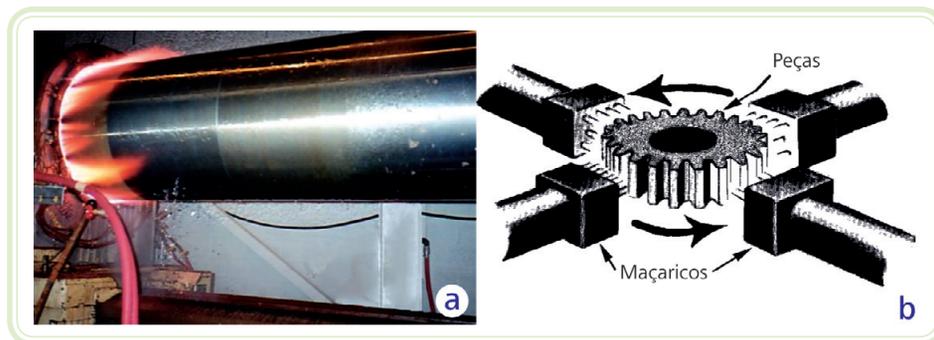


Figura 7.3: Têmpera superficial por chama no método progressivo

Fonte: (a) http://www.thermobondflame.com/_mndata/thermobond/thumbnails_large/156238.jpg
 (b) SENAI-SP, 1999

No **método combinado**, a peça e o maçarico movem-se simultaneamente. Esse método requer o uso de máquinas ou dispositivos especiais. É aplicado, geralmente, em peças cilíndricas e de grande tamanho. A dureza final obtida varia de 53 a 62 *Rockwell C*. A espessura da camada endurecida pode atingir até 10 mm, dependendo da composição do aço e da velocidade de deslocamento da chama.

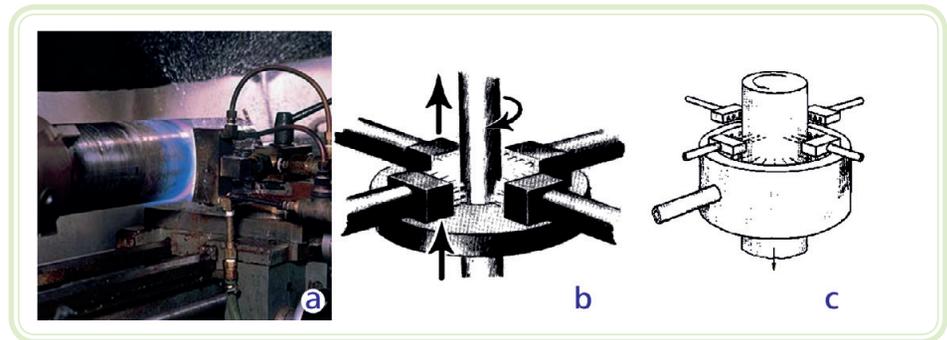


Figura 7.4: Têmpera superficial por chama no método progressivo

Fonte: (a) <http://www.flametreatingsystems.com/progresss.jpg>
(b) e (c) SENAI-SP, 1999

7.3 Têmpera por indução (*Induction Hardening*)

Nesse processo, a parte a ser endurecida é colocada no interior de uma bobina submetida à passagem de corrente alternada. O campo energiza a peça, provocando seu aquecimento.

Dependendo da frequência e da corrente, podem-se controlar a taxa e a profundidade de aquecimento. Uma unidade para aquecimento indutivo compõe-se de um aparelho de alta frequência e de uma bobina de trabalho. A bobina é feita de tubo fino de cobre, com uma ou mais espiras, e toma a forma da área da peça que se deseja aquecer.

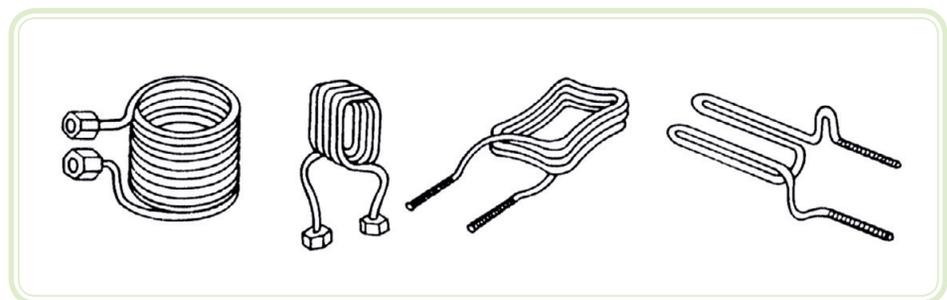


Figura 7.5: Espirais utilizadas no aquecimento indutivo de peças

Fonte: SENAI-SP, 1999

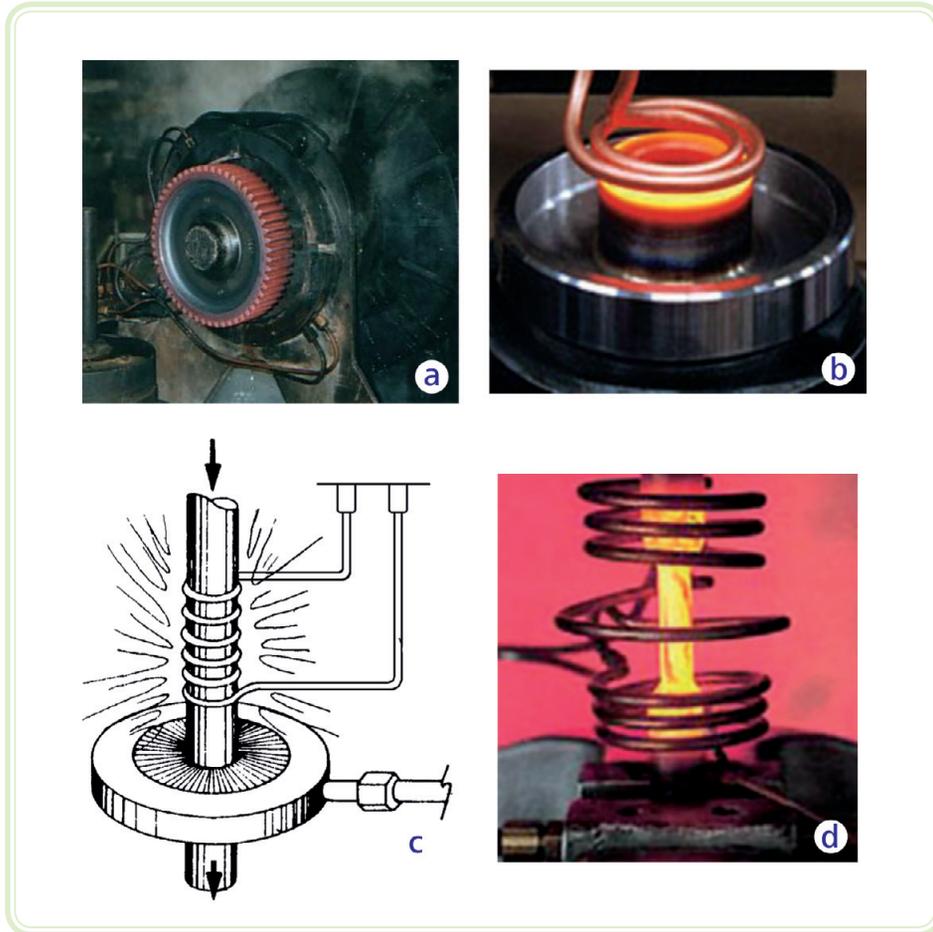


Figura 7.6: Têmpera superficial por indução de diversas peças

Fonte: (a) <http://www.thermobondflame.com/>

(b) e (d) http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6397-processos-seletivos-de-endurecimento#.TpbVhd7IE8k

(c) SENAI-SP, 1999

A frequência da corrente alternada aplicada à bobina de trabalho, influi no grau de aquecimento da peça. Se alta frequência for utilizada, ocorre pouca profundidade; se baixa, grande profundidade. Na prática, emprega-se a frequência de 450 khz.

7.4 Endurecimento por *laser* (*Laser Beam Hardening*)

Nesse tratamento superficial, as áreas selecionadas da peça são expostas ao *laser* e se aquecem. Variando a potência do *laser*, a profundidade de absorção do calor pode ser controlada. É um processo muito preciso e seletivo sobre áreas bem específicas. Além disso o processo pode ser feito em alta velocidade, produzindo pouca distorção.

O *laser* (sigla em inglês que significa *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou seja, Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação) é um dispositivo de irradiação eletromagnética (luz) com características peculiares, pois é monocromática (com comprimento de onda eletromagnética bem determinado), colimada (propaga como um feixe de ondas com alinhamento quase paralelo) e coerente (onde as ondas eletromagnéticas possuem igual posição relativa ou fase).

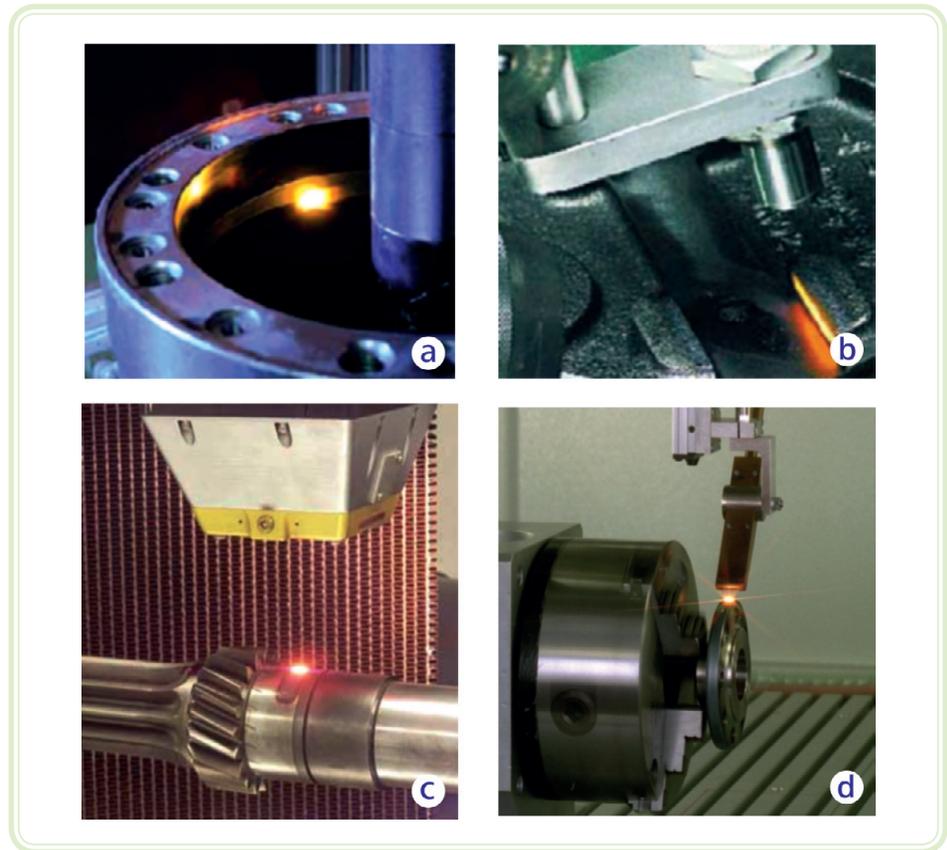


Figura 7.7: Aplicações de têmpera superficial à laser

Fonte: (a) e (b) Metals Handbook apud Strohaecker, 2003

(c) http://images.pennnet.com/articles/ils/thm/th_137940.jpg

(d) <http://www.techpilot.net/static/companyLogos/techpilot/05/0547/054703/05470319.jpg>

Resumo

Nesta aula estudaram-se os tratamentos térmicos aplicados na superfície de metais, suas aplicações e principais características.

Estudou-se o procedimento aplicado nos tratamentos térmicos utilizados para o endurecimento superficial de peças, tais como têmpera superficial por chama, por indução eletromagnética e por *laser*.

Atividades de aprendizagem



1. Descreva o procedimento operacional aplicado na têmpera superficial por chama.
2. Descreva o procedimento operacional aplicado na têmpera superficial por indução.
3. Descreva o procedimento operacional aplicado no endurecimento por *laser*.
4. Diferencie o procedimento dos três métodos aplicados as têmperas superficiais por chama.

Aula 8 – Tratamentos termoquímicos

Objetivos

Conhecer os tratamentos termoquímicos de nitretação e cementação, suas aplicações cotidianas e características.

Descrever os princípios dos tratamentos termoquímicos de cianetação, boretação e carbonitretação em aços, analisando suas características e aplicações práticas.

8.1 Características

Os tratamentos térmicos não alteram a composição química do aço. Contudo, às vezes, necessita-se submeter o aço a alterações em sua composição química para melhorar as propriedades de sua superfície. Essas modificações são obtidas por meio de **tratamentos termoquímicos**.

Os tratamentos termoquímicos têm como objetivo aumentar a dureza e a resistência do material ao desgaste de sua superfície, mantendo o núcleo dúctil e tenaz. Os principais são cementação, nitretação, cianetação, carbonitretação e nitretação, conforme se apresentam no esquema da Figura 8.1.

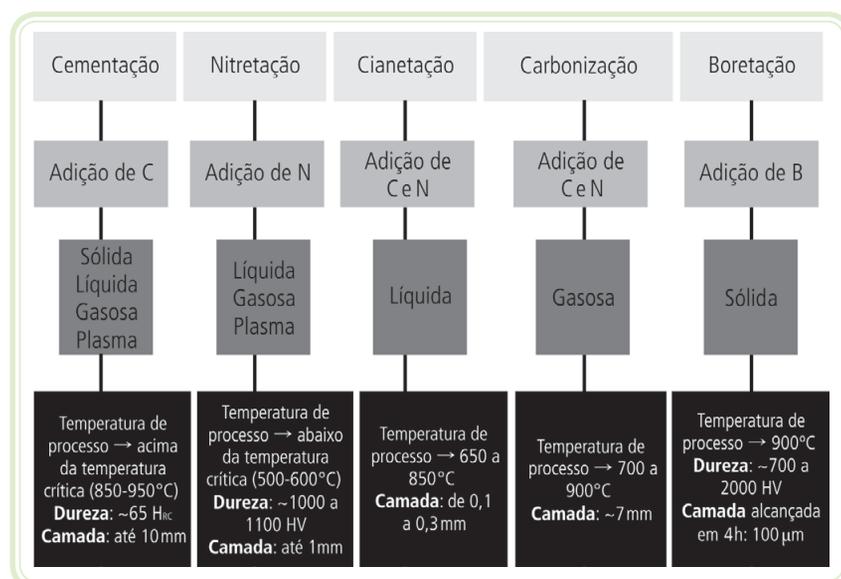


Figura 8.1. Principais tratamentos termoquímicos

Fonte: Oliveira, 2007

8.2 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 seja inferior a 0,25%.

A cementação aumenta esse teor até em torno de 1%, assegurando uma superfície dura e um núcleo tenaz.

Peças fabricadas em aço com porcentagem média ou alta de carbono que vão sofrer operações severas de dobramento, tendem a trincar-se. Todavia, se elas forem confeccionadas com aço de baixo carbono (1010) e, depois, forem conformadas e cementadas, bons resultados ocorrerão sem que elas corram o risco de trincarem.

Uma engrenagem temperada superficialmente é mostrada na Figura 8.2 onde a superfície do dente está escurecida em função do tratamento térmico superficial, após ataque com reagente químico nital (solução alcoólica de ácido nítrico), permanecendo o núcleo claro inalterado.

A cementação pode ser sólida, gasosa, líquida ou a plasma.

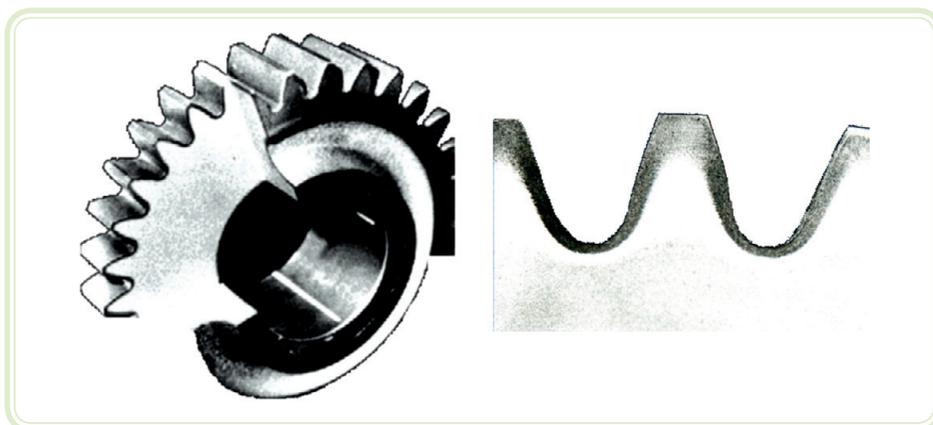


Figura 8.2: Aspecto de uma engrenagem após tratamento termoquímico de cementação
Fonte: Oliveira, 2007

8.2.1 Cementação sólida

Nesse tipo de cementação, a peça é colocada em uma caixa de aço contendo substâncias ricas em carbono: carvão de lenha, coque, carbonato de cálcio e óleo de linhaça. Em seguida, a peça é levada ao forno, a uma temperatura em torno de 930°C, durante o tempo necessário para obtenção da camada desejada. Depois, submete-se a peça à têmpera para que ela adquira dureza.

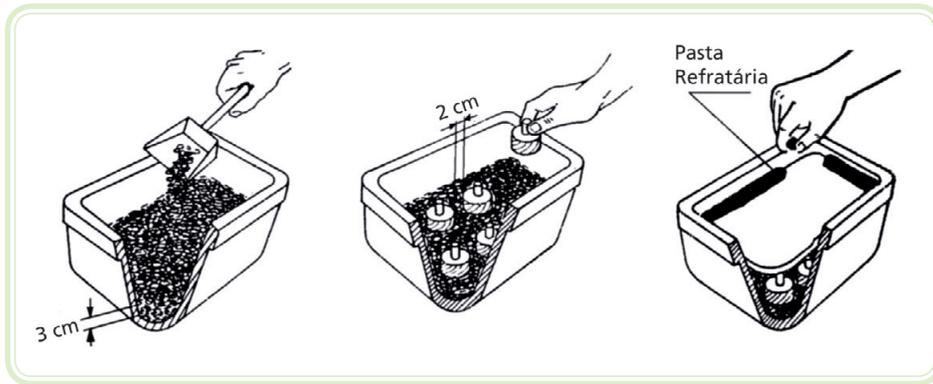


Figura 8.3: Cementação sólida em caixa

Fonte: SENAI-SP, 1999

O tempo de permanência no forno pode variar de 1 a 30 horas, e a camada cementada varia de 0,3 mm a 2,0 mm.

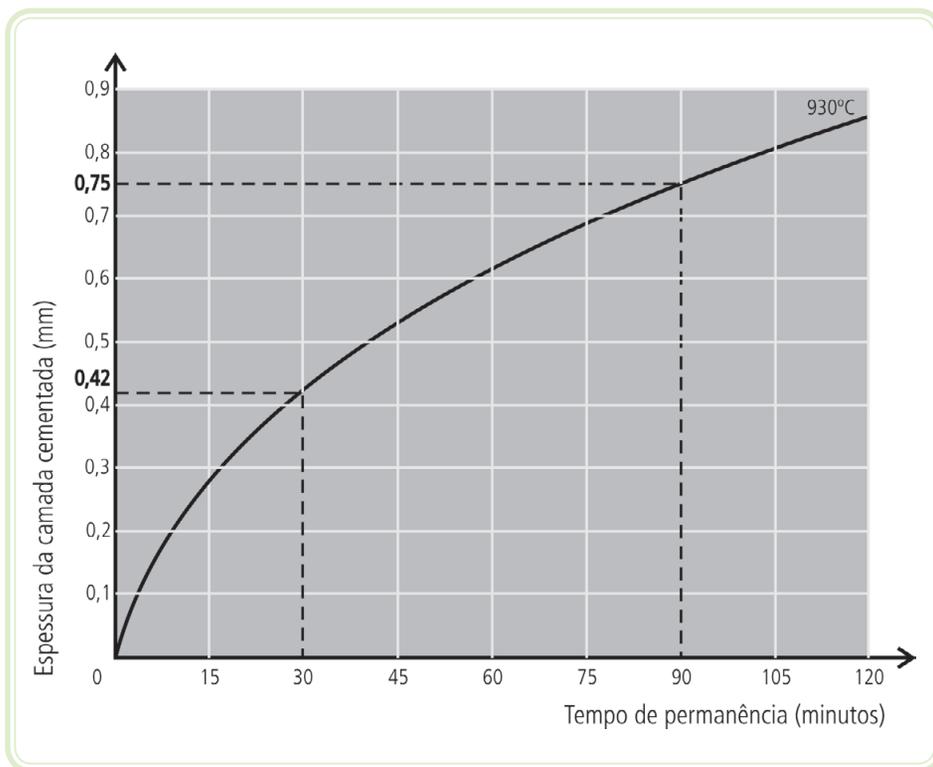


Figura 8.4: Cementação sólida em caixa

Fonte: SENAI-SP, 1999

8.2.2 Cementação gasosa

É o processo mais eficiente, pois permite cementar as peças com maior uniformidade e com economia de energia. Utiliza gás butano (de cozinha) ou gás natural para a geração de carbono. A temperatura varia de 850 a 950°C. Após a cementação, o aço é temperado em óleo, onde poderá ocorrer a formação de martensita.

8.2.3 Cementação líquida

Geralmente se utilizam sais fundidos, ricos em carbono, à base de cianeto e de carbonato, em geral.

A temperatura deve ser de 930 a 950°C. Nessa temperatura, os sais se tornam líquidos, pois se fundem por volta de 650°C. Em seguida, as peças preaquecidas a 400°C são mergulhadas em banho fundido. A função do preaquecimento é a de eliminar água e evitar choque térmico. Resfria-se a peça em salmoura com 10 a 15% de cloreto de sódio (NaCl), ou em óleo de têmpera.

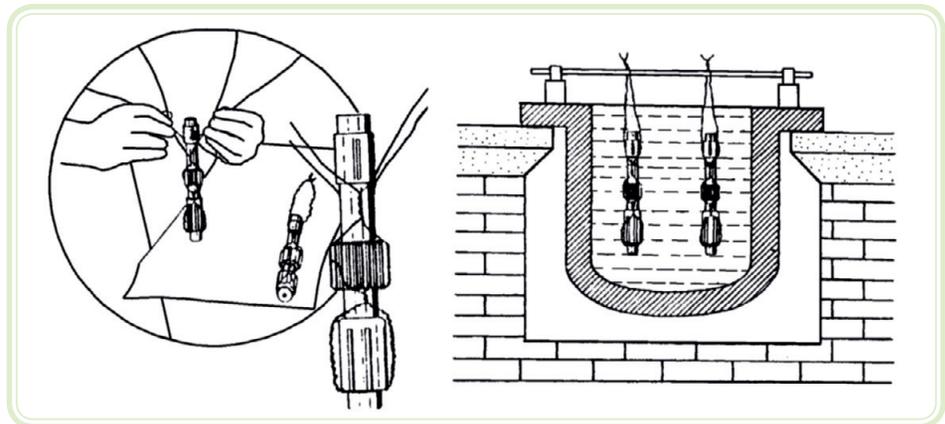


Figura 8.5: Cementação líquida

Fonte: SENAI-SP, 1999

8.2.4 Cementação a plasma

O processo de cementação a plasma é utilizado nos últimos anos em uma série de ramos da indústria. Seus benefícios foram aplicados no tratamento térmico de peças automotivas e, recentemente, vem sendo aplicado na indústria aeroespacial.

A cementação a plasma é um processo que gera uma camada superficial de carboneto que aumenta a dureza e a resistência ao desgaste da peça.

Na cementação a gás, os gases de hidrocarbonetos reagem com a superfície do metal, aumentando o seu teor de carbono. Na cementação a plasma, por outro lado, esses reagentes gasosos formam um plasma que é usado para tratar a superfície do componente em tratamento.

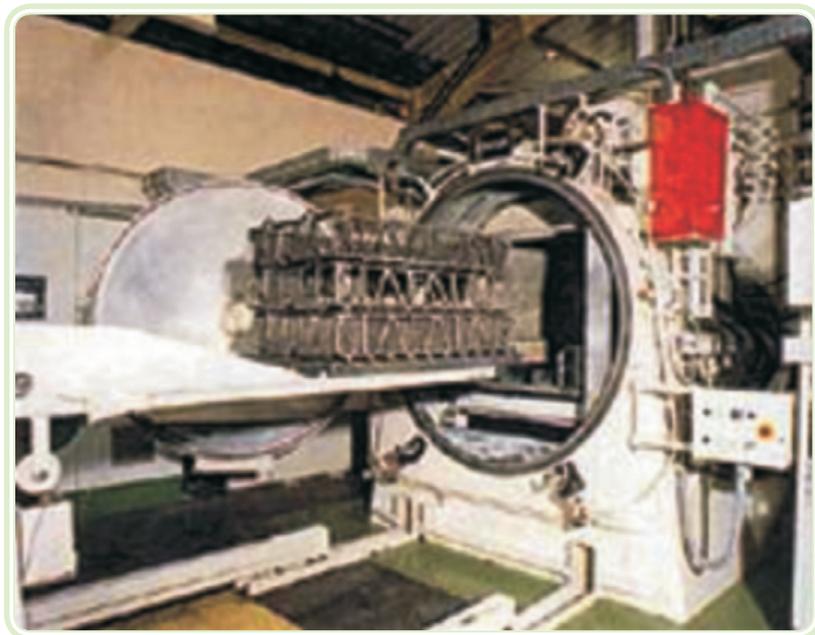


Figura 8.6: Lote de componentes preparados para cementação à plasma

Fonte: <http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=862>

A cementação a plasma oferece uma série de vantagens sobre cementação a gás tradicional.

As camadas carburizadas produzidas pelo processo têm melhores estrutura e propriedades mecânicas. Dessa forma, não há oxidação interna e a camada tem melhor uniformidade, o que, muitas vezes, leva a menor distorção do componente cementado. Além disso, controlar a formação de camadas cementadas a plasma é mais fácil visto que a quantidade de carbono transferida para a superfície depende da densidade de corrente elétrica de plasma aplicada, o que pode ser monitorado e controlado.

Como resultado, o processo oferece muito boa reprodutibilidade.

A cementação a plasma pode oferecer tempos de aplicação menores do que os processos tradicionais, em parte, graças ao uso de altas temperaturas. No caso, em cementação a profundidades de 2,5 a 3 mm, podem-se alcançar resultados satisfatórios por cementação a plasma em baixa pressão em cerca de 20 horas, aproximadamente metade do necessário nos processos convencionais.

8.3 Nitretação

A nitretação é indicada na obtenção de peças com superfície de maior dureza, para aumentar a resistência ao desgaste, à fadiga, à corrosão e ao calor e consiste em adicionar nitrogênio ao aço.

Os aços que melhor se prestam a esse tratamento são os que contêm cromo, molibdênio, alumínio e níquel.

Em geral, a nitretação é feita depois da têmpera e do revenimento. Assim, as peças nitretadas não precisam de nenhum outro tratamento térmico, o que contribui para um baixo índice de distorção ou empenamento. A nitretação pode ser feita a gás, em banho de sal, ou a plasma.

A nitretação é muito utilizada na indústria metal-mecânica (automobilística, por exemplo), sendo aplicada em peças como girabrequins, camisas de cilindros, pinos, rotores que precisam ter alta resistência ao desgaste sob temperatura relativamente elevada.

8.3.1 Nitretação a gás

A temperatura conveniente neste processo é de 500 a 530°C, e sua duração varia de 40 a 90 h. Nessa temperatura, a amônia (NH₃) é decomposta, e o nitrogênio, na camada superficial da peça, atinge uma profundidade de até 0,8 mm, conforme pode ser observado na Figura 8.7.

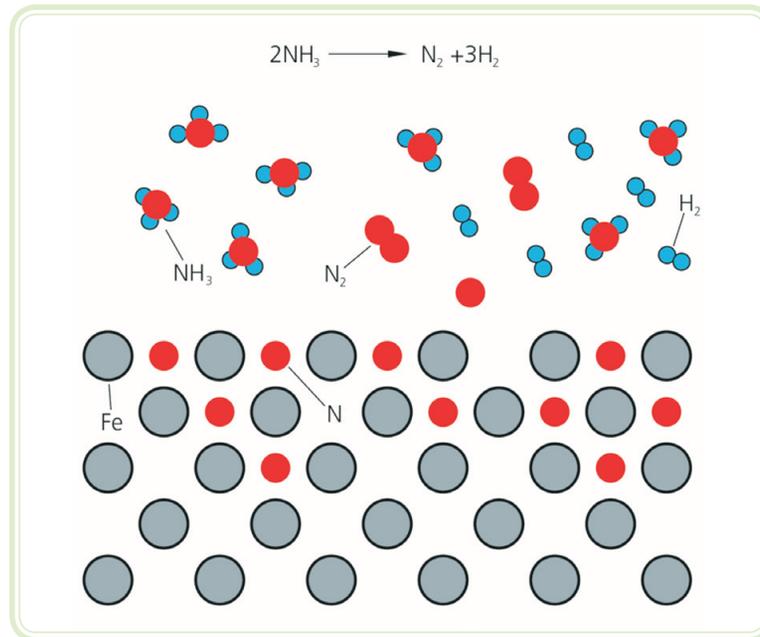


Figura 8.7: Dissociação da amônia em nitrogênio e absorção pelo aço

Fonte: <http://www.materiais.ufsc.br/lcm/TratTermoquimicosSuperficiais.pdf>

Formar-se-á uma camada na superfície metálica de nitretos de ferro, cromo, molibdênio e níquel (alta dureza). Decorrido o tempo de aquecimento no forno, as peças são retiradas e resfriadas ao ar.

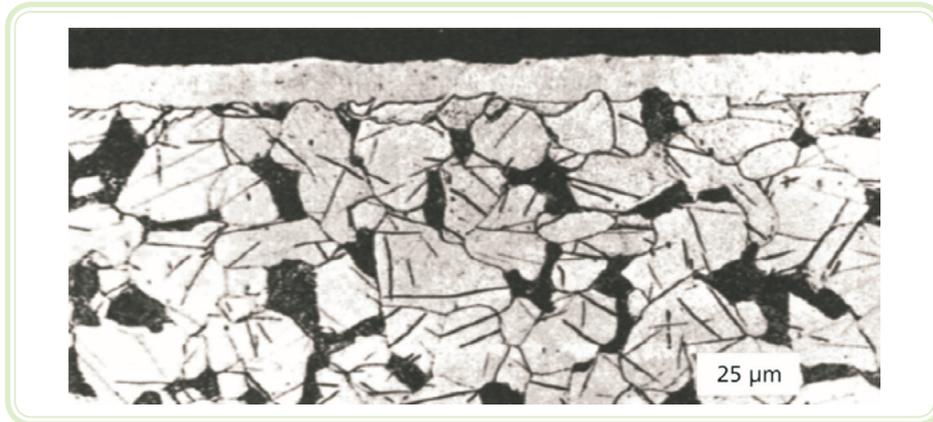


Figura 8.8: Microestrutura de aço AISI 1015, nitretado por meios gasosos (notar superfície nitretada na camada superior e microestrutura do aço, na inferior)

Fonte: <http://www.materiais.ufsc.br/lcm/TratTermoquimicosSuperficiais.pdf>

8.3.2 Nitretação em banho de sal (líquida)

As peças são mergulhadas num banho de sais fundidos, que são as fontes de nitrogênio.

O processo é mais rápido que o anterior. As peças permanecem no banho apenas 2 ou 3 horas a uma temperatura que varia de 500 a 580°C.

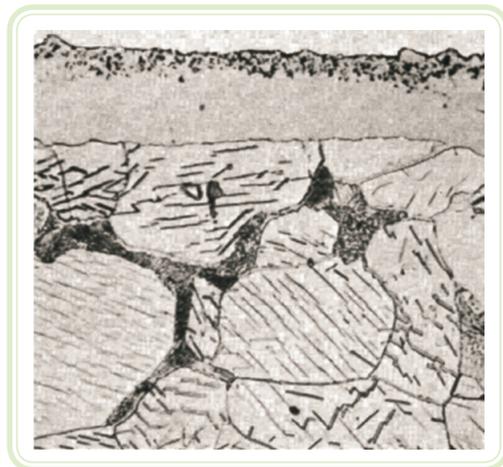


Figura 8.9: Microestrutura de aço-carbono nitretado por meios líquidos (notar superfície nitretada na camada superior e microestrutura do aço, na inferior)

Fonte: <http://www.materiais.ufsc.br/lcm/TratTermoquimicosSuperficiais.pdf>

8.3.3 Nitretação a plasma

A indústria metal-mecânica demanda aços com propriedades mecânicas cada vez mais exigentes com o passar dos tempos, combinando baixos custos e melhor desempenho.

O processo de nitretação a plasma envolve um complexo conjunto de fenômenos que são mostrados na Figura 8.10.

O plasma é constituído por um gás parcialmente ionizado, contendo íons e elétrons em equilíbrio dinâmico em que o sistema mantém a neutralidade globalmente. Os íons são acelerados na direção do material pela aplicação de um campo elétrico negativo nas peças a serem tratadas. Após a implantação, esses íons neutralizam-se e penetram por difusão térmica no corpo do material.

A presença de oxigênio (em geral, ar ambiente residual) deve ser controlada para permitir boa formação da camada nitretada.

Diferentemente de outros processos, tais como nitretação a gás e banhos de sais, a nitretação a plasma permite um controle apurado das espécies que dão origem ao processo, resultando um produto de alta qualidade.

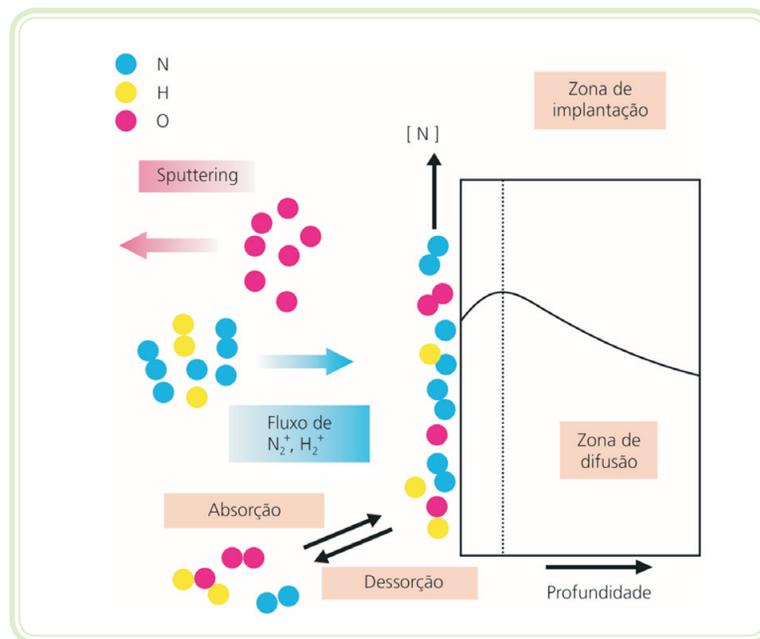


Figura 8.10: Esquema do processo de nitretação a plasma

Fonte: <http://www.ifi.unicamp.br/~alvarez/Plasma-LIITS/>

A nitretação a plasma é aplicada em qualquer aço com elementos formadores de nitretos, não necessariamente inoxidável. Introduzindo um gás que contenha carbono além do N_2 , é possível fazer nitrocementação em aços ao C.

Algumas empresas utilizam o processo a plasma para nitretar peças de aços baixa-liga. Este processo foi selecionado porque permite a integração do reator de plasma com a linha de produção.

Os aços inoxidáveis austeníticos sofrem frequentemente severo desgaste metálico, devido à formação de junções fortes da adesão entre as superfícies de contato. Nessas situações, é necessário modificar a estrutura e a composição da superfície do componente para eliminar o problema de desgaste, sem prejudicar a resistência à corrosão.

Várias técnicas foram desenvolvidas com essa intenção, nas quais estão a nitretação por plasma em baixas temperaturas e os tratamentos duplex que envolvem a deposição de revestimentos cerâmicos sobre substratos previamente nitretados.

Nitretação a plasma produz uma fina camada que tem dureza elevada e boa resistência à corrosão.

8.4 Carbonitretação

Consiste em introduzir carbono e nitrogênio na superfície do aço.

O processo pode ser realizado em fornos de banhos de sal ou de atmosfera controlada (a gás).

A superfície da camada carbonitretada adquire dureza e resistência ao desgaste.

A temperatura do processo varia de 705 a 900°C, com duração de 2 horas. Após o tratamento, há resfriamento em água ou óleo.

Obtém-se uma camada com espessura de 0,07 mm a 0,7 mm.

A carbonitretação é usada, geralmente, em peças de pequeno porte, como componentes de carburadores, relógios, aparelhos eletrodomésticos.

8.5 Cianetação

A cianetação consiste na adição de carbono e nitrogênio ao aço, variando a temperatura do processo de 650 a 850°C. A camada tratada alcança a profundidade de 0,1 mm a 0,3 mm.

É considerada a carbonitretação realizada em meio líquido.

8.6 Boretação

A boretação, por outro lado consiste no enriquecimento superficial com boro no aço. A temperatura de processo é de 900°C.

Os aços têm sua dureza superficial aumentada, alcançando até 2000 Vickers (HV). A camada boretada, em 4 horas de tratamento termoquímico é de 100 µm.

A boretação é utilizada em peças que necessitam de alta resistência à abrasão.

Resumo

Nesta aula, estudaremos os tratamentos termoquímicos de nitretação e cementação, suas aplicações cotidianas e características principais.

Descreveram-se também os princípios dos tratamentos termoquímicos de cianetação, boretação e carbonitretação em aços, analisando suas características e aplicações.



Atividades de aprendizagem

1. O que é um tratamento termoquímico e quais são suas principais características?
2. Cite as diferenças existentes entre os processos de cementação sólida, líquida, gasosa e à plasma.
3. O que é nitretação? Diferencie os tipos de nitretação existentes.
4. Descreva os processos de carbonitretação, cianetação e boretação.

Aula 9 – Tratamentos térmicos de metais não ferrosos e tratamentos subzero

Objetivos

Descrever os tratamentos térmicos a serem aplicados em metais não ferrosos, como o cobre, identificando suas qualidades e aproveitamentos.

Caracterizar os tratamentos térmicos a serem aplicados em metais a temperaturas abaixo de zero grau Celsius.

9.1 Tratamentos térmicos do cobre e suas ligas

Os tratamentos mais empregados no cobre e suas ligas são a homogeneização, o recozimento, o alívio de tensões, a solubilização e o endurecimento por precipitação.

9.1.1 Homogeneização

O objetivo é eliminar ou diminuir a formação de trincas de lingotes que devam ser trabalhados a frio ou a quente. Aplica-se principalmente nas ligas – bronze-Sn, bronze-Si e Cu-Ni; consiste no aquecimento a uma temperatura de cerca de 90°C acima da máxima temperatura de recozimento (515 a 905°C), durante tempo prolongado.

9.1.2 Recozimento

É aplicado nas ligas trabalhadas a frio para promover a sua recristalização. Dependendo das ligas, as temperaturas variam de 260 a 650°C para o cobre e de 425 a 815°C para as ligas. Quanto maior o encruamento prévio, menor a temperatura de recristalização ou recozimento.

9.1.3 Alívio de tensões

Algumas ligas de cobre estão sujeitas à ruptura por fissuração, devido à corrosão sob tensão; as ligas mais suscetíveis a esse fenômeno são os latões, que contêm 20% ou mais de zinco.

Consiste em aquecer, durante 1h, a temperaturas que, conforme as ligas, variam de 190 a 260°C.

9.1.4 Solubilização e endurecimento por precipitação

Entre as ligas que são comumente submetidas a esse tratamento, citam-se o bronze o alumínio e o Cu-Be.

No caso da última liga, o tratamento consiste inicialmente em se solubilizar por aquecimento, pelo período de 1 a 3 horas, de 775 e 1035°C, conforme o tipo da liga, seguindo-se a precipitação, a temperaturas que variam de 300 a 510°C pelo período de 2 a 5 horas.

9.2 Tratamentos subzero

O tratamento térmico subzero é uma particularidade dos tratamentos convencionais, pois é realizado abaixo de 0°C.

O resfriamento de um aço a uma temperatura abaixo de zero grau Celsius necessita dessa temperatura para transformar a austenita retida em martensita.

Para alguns aços modernos, principalmente os inoxidáveis, esse tratamento é altamente recomendado, pois os elementos de liga (materiais que são misturados ao aço para melhorar suas qualidades mecânicas) podem inibir a têmpera, fazendo com que até 30% do aço não endureça. A melhor maneira de se corrigir essa falha é pelo do resfriamento muito abaixo de zero (pelo menos 50 graus negativos).

Um material muito usado para esse tipo de tratamento é o nitrogênio líquido que pode atingir até -196°C, o que é mais do que suficiente para a execução desse tratamento térmico. O tratamento subzero faz com que até 100% do aço endureça.

Resumo

Nesta aula descreveram-se os tratamentos térmicos aplicados em metais não ferrosos, como cobre identificando suas principais características.

Os princípios de execução dos tratamentos térmicos realizados em metais abaixo da temperatura de zero graus Celsius também foram apresentados.

Atividades de aprendizagem



1. Descreva, resumidamente, os processos de tratamentos térmicos do cobre e suas ligas.
2. O que são tratamentos térmicos subzero? Cite algumas de suas características principais.

Referências

- AVNER, S. H. **Introduction to physical metallurgy**. 2. ed. The McGraw-Hill Companies, 1990.
- BAIN, E. C. **Functions of the alloying elements in steel**. American Society for Materials, 1939.
- BARREIRO, J. A. **Tratamientos térmicos de los aceros**. Madrid: Ed. Dossat-Plaza de Santa Ana, 1971.
- BOYER, H. (Ed.). **Atlas of isothermal transformation and cooling transformation diagrams**. American Society for Metals, 1977.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma Introdução**. 5. ed. São Paulo: LTC, 2002.
- CARUSO, J. **Tratamento térmico**. São Paulo: CEFET - SP, 2004.
- CHIAVERINI, A. **Aços e ferros fundidos**. 4. ed. São Paulo: Editora ABM, 2004.
- COSTA, E. M. **Aços**. PUC/RS, 2003. Disponível em: <www.em.pucrs.br/~eleani/Protegidos/classificacaoacos.ppt3>.
- GUY, A. G. **Essentials of material science**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1978.
- GUY, A. G. e HREN, J. J. **Elements of physical metallurgy**. 3. ed. Reading-MA: Addison-Wesley Publishing Co., 1994.
- HUME-ROTHERY, W. **Estrutura das ligas de ferro**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda., 1968.
- LESLIE, W. C. **The physical metallurgy of steels**. London: McGraw-Hill International Book Co, 1982.
- Metals Handbook. **American society for metals**. 10. ed. Ohio: Metals Park.
- Metals Handbook. Metallography and microstructures. **American society for metals**. 9. ed. v. 9. Ohio: Materials Park, 1985.
- MOREIRA, A. L. S. **Estrutura e propriedade dos materiais**. UFPA, 1998.
- MOREIRA, M. F. **Siderurgia**. 2004. Disponível em: <<http://dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/siderurgia2.pdf>>.
- OLIVEIRA, A. R. **Tratamento térmico**. Pará: IFPA, 2007.

REED-HILL, R. E. **Princípios de metalurgia física**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1982.

SENAI-SP. **Processos de fabricação, módulo: tratamento térmico**. v. 5. São Paulo. Apostila

STROHAECKER, T. R.; FRAINER, V. J. **Princípios de tratamentos térmicos**. Rio Grande do Sul, 2003.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1984.

Currículo do professor-autor



O professor **Alan Rafael Menezes do Vale** é formado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará em 2003, possuindo Mestrado nesta mesma instituição na área de conhecimento Vibrações e Acústica, em 2006, participando efetivamente da formação e estabelecimento do GVA-UFPA (Grupo de Vibrações e Acústica da Universidade Federal do Pará), tendo desenvolvido, ainda, trabalhos referentes a esta área, em parceria com PIBIC, FUNPEA, FADESP e Eletronorte.

Foi professor substituto do Curso Técnico de Metalurgia do IFPA de 2007 a 2009, ministrando as disciplinas Noções de Automação Industrial, Soldagem e Tratamento Térmico.

É professor do IFPA, pelo EAD desde Agosto de 2009, contribuindo na elaboração dos materiais didáticos das disciplinas Noções de Automação Industrial, pelo 2º Módulo do Curso Técnico em Metalurgia à Distância e Tratamento Térmico, do 3º Módulo deste curso.

Atualmente atua como profissional de engenharia mecânica no ramo de projeto e manutenção de sistemas de refrigeração comercial.