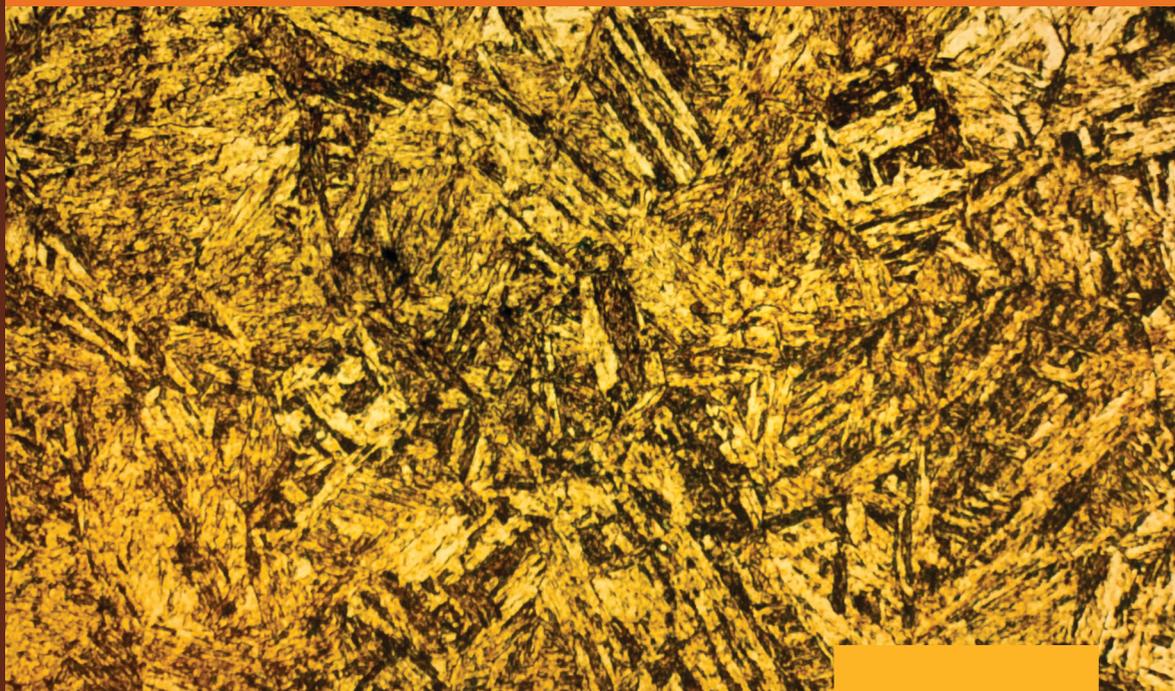

TRATAMENTOS TÉRMICOS E SUPERFICIAIS DOS AÇOS



CARLOS EDUARDO PINEDO

COLEÇÃO
DE LIVROS
abm

Blucher

 **abm**
Associação Brasileira de
Metalurgia, Materiais e Mineração

Carlos Eduardo Pinedo

TRATAMENTOS TÉRMICOS E SUPERFICIAIS DOS AÇOS

Tratamentos térmicos e superficiais dos aços

© 2021 Carlos Eduardo Pinedo
Editora Edgard Blücher Ltda.

Imagem da capa: Microestrutura do aço inoxidável martensítico tipo AISI 410 temperado a partir de 950 °C. Microscopia óptica com técnica de luz polarizada. Reagente de Vilella. 250x.

Publisher Edgard Blücher

Editor Eduardo Blücher

Coordenação editorial Jonatas Eliakim

Produção editorial Bárbara Waida

Preparação de texto Beatriz Carneiro

Diagramação Taís Lago

Revisão de texto MPMB

Capa Leandro Cunha

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil
Tel 55 11 3078-5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico,
conforme 5. ed. do *Vocabulário Ortográfico
da Língua Portuguesa*, Academia Brasileira de
Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por
quaisquer meios sem autorização escrita da
editora.

Todos os direitos reservados pela Editora
Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Pinedo, Carlos Eduardo
Tratamentos térmicos e superficiais dos aços / Carlos
Eduardo Pinedo. -- São Paulo : Blucher, 2021.
326 p. (Coleção de Livros ABM em Metalurgia,
Materiais e Mineração)

ISBN 978-65-5506-224-3 (impresso)
ISBN 978-65-5506-221-2 (eletrônico)

1. Aços 2. Aços - Tratamento térmico I. Título II. Série

18-0767

CDD 621.4021

Índices para catálogo sistemático:
1. Aços - Tratamento térmico

APRESENTAÇÃO DA COLEÇÃO DE LIVROS ABM

A Coleção de Livros ABM em Metalurgia, Materiais e Mineração, criada em 2005, tem por principais objetivos suprir lacunas de conhecimentos e estimular o desenvolvimento de pessoas.

De forma a ter uma abordagem mais didática, a coleção foi segmentada em quatro séries:

Livros de Referência – apresentam-se como materiais para consulta rápida de informações úteis, gerais ou focalizadas em um determinado campo do conhecimento, abrangendo, normalmente, tabelas, estatísticas, definições, exemplos, históricos e outros tipos de conteúdo.

Obras de Difusão – têm o propósito de levar a notícia e o conhecimento até o leitor comum, familiarizando-o com a natureza do progresso científico e tecnológico, bem como apresentar implicações econômicas, sociais e políticas, em uma sociedade exposta a constantes mudanças.

Livros de Atualização – fornecem ao leitor mais experiente a abordagem de assuntos especializados que complementam o conhecimento técnico-científico, além de atualização sobre os progressos nas áreas de metalurgia, materiais e mineração.

Livros-texto – destinam-se a leitores iniciantes ou que queiram se aprofundar no assunto, abordando temas de Fundamentos, Matérias-primas e Processos, Produtos e Aplicações e Gestão, seguindo uma sequência lógica de assunto e grau progressivo de dificuldade, compatíveis com a finalidade didática do livro.

O livro *Tratamentos Térmicos e Superficiais dos Aços* é fruto de mais uma parceria entre ABM e Editora Blucher, e vem enriquecer a Coleção de Livros, contribuindo com a série Livros-texto.

CONTEÚDO

PREFÁCIO	13
CAPÍTULO 1 – O SISTEMA FERRO-CARBONO	15
1.1 Introdução	15
1.2 Alotropia do ferro.....	16
1.3 Diagrama de fases Fe-Fe ₃ C.....	20
1.4 Efeito dos elementos de liga no sistema Fe-C.....	26
Referências.....	31
CAPÍTULO 2 – TRANSFORMAÇÕES FORA DO EQUILÍBRIO	33
2.1 Introdução.....	33
2.2 Curvas TTT e TRC.....	34
2.3 Transformações fora do equilíbrio	41
2.3.1 <i>Transformação bainítica</i>	41
2.3.2 <i>Transformação martensítica</i>	43
2.4 Temperabilidade.....	48
2.5 Métodos para determinação da temperabilidade	51
2.5.1 <i>Método de Grossmann</i>	52
2.5.2 <i>Método Jominy</i>	55

2.6 Severidade de resfriamento ou de têmpera	58
2.7 Conceito de tratamento térmico	61
Referências.....	64
CAPÍTULO 3 – RECOZIMENTO E NORMALIZAÇÃO	67
3.1 Introdução	67
3.2 Recozimento pleno.....	68
3.3 Recozimento de esferoidização.....	70
3.4 Recozimento para alívio de tensões.....	73
3.5 Recozimento para recristalização.....	75
3.5.1 Recuperação.....	76
3.5.2 Recristalização	76
3.5.3 Crescimento de grão	78
3.6 Recozimento de homogeneização.....	79
3.7 Normalização.....	82
Referências.....	86
CAPÍTULO 4 – TÊMPERA E REVENIMENTO.....	87
4.1 Introdução	87
4.2 Têmpera	88
4.2.1 <i>Variação dimensional e de forma</i>	95
4.3 Revenimento	96
4.3.1 <i>Transformações no revenimento</i>	97
4.3.2 <i>Propriedades mecânicas no revenimento</i>	99
4.3.3 <i>Revenimento de aços ligados</i>	101
4.3.4 <i>Fragilização ao revenido</i>	104
Referências.....	105
CAPÍTULO 5 – AUSTÊMPERA	107
Referências.....	110

CAPÍTULO 6 – ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO	111
Referências.....	116
CAPÍTULO 7 – TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	117
7.1 Introdução	117
7.2 Cementação.....	118
7.2.1 Difusão.....	122
7.2.2 Têmpera e revenimento.....	125
7.2.3 Carbonitretação.....	127
7.3 Nitretação.....	129
7.3.1 O sistema Fe-N.....	130
7.3.2 Cinética de nitretação.....	132
7.3.3 Microestrutura da superfície nitretada	134
7.3.4 Endurecimento da superfície nitretada.....	138
7.3.5 Efeito dos elementos de liga na resposta à nitretação	142
7.3.6 Nitrocarburação	146
7.4 Processos de nitretação.....	147
7.4.1 Nitretação gasosa.....	147
7.4.2 Nitretação em banhos de sais	150
7.4.3 Nitretação sob plasma.....	151
7.5 Nitretação e pós-oxidação.....	162
7.6 Revestimento PVD	163
7.7 Têmpera superficial	167
7.7.1 Têmpera por chama.....	168
7.7.2 Têmpera por indução.....	169
7.7.3 Têmpera a laser	170
Referências.....	172

CAPÍTULO 8 – TRATAMENTO TÉRMICO E SUPERFICIAL DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.....	179
8.1 Introdução.....	179
8.2 Aços inoxidáveis austeníticos.....	181
8.2.1 Solubilização.....	182
8.2.2 Recristalização.....	183
8.3 Aços inoxidáveis ferríticos.....	185
8.4 Aços inoxidáveis martensíticos.....	186
8.4.1 <i>Têmpera dos aços inoxidáveis martensíticos.....</i>	<i>189</i>
8.4.2 <i>Revenimento dos aços inoxidáveis martensíticos.....</i>	<i>194</i>
8.5 Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação.....	200
8.6 Aços inoxidáveis duplex.....	206
8.7 Nitretação dos aços inoxidáveis.....	210
8.7.1 <i>Nitretação dos aços inoxidáveis austeníticos.....</i>	<i>211</i>
8.7.2 <i>Nitretação dos aços inoxidáveis martensíticos.....</i>	<i>219</i>
8.7.3 <i>Nitretação dos aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação.....</i>	<i>225</i>
8.7.4 <i>Nitretação dos aços inoxidáveis ferrítico e duplex.....</i>	<i>229</i>
Referências.....	235
CAPÍTULO 9 – TRATAMENTOS TÉRMICOS E SUPERFICIAIS DOS AÇOS FERRAMENTA.....	243
9.1 Introdução.....	243
9.2 Aços ferramenta para trabalho a frio.....	246
9.2.1 <i>Aço ferramenta AISI O1.....</i>	<i>246</i>
9.2.2 <i>Aço ferramenta AISI D2.....</i>	<i>251</i>
9.2.3 <i>Aço ferramenta AISI D6.....</i>	<i>264</i>
9.2.4 <i>Aço ferramenta com 1%C-8%Cr.....</i>	<i>267</i>
9.3 Aços ferramenta para trabalho a quente.....	271
9.4 Aços rápido.....	282
9.5 Tratamento criogênico dos aços ferramenta.....	294
9.6 Tratamentos superficiais dos aços ferramenta.....	299

9.6.1 Aços ferramenta para trabalho a quente	299
9.6.2 Aços ferramenta para trabalho a frio.....	306
9.6.3 Aços rápido.....	310
9.7 Tratamento duplex: nitretação e revestimento PVD	312
Referências.....	317

CAPÍTULO 1

O SISTEMA FERRO-CARBONO

1.1 INTRODUÇÃO

Componentes metálicos são utilizados amplamente em diversos setores industriais. Esses componentes são fabricados principalmente com ligas à base de ferro, alumínio, cobre e níquel e se enquadram em aplicações específicas em função das propriedades necessárias para atingir o desempenho previsto do componente em serviço.

As ligas à base de ferro são, sem dúvida, as de maior importância e aplicação industrial, seja no número e variedade de componentes fabricados, seja na quantidade produzida anualmente nas usinas siderúrgicas. Essas ligas possuem o carbono como elemento de liga principal, e o sistema Fe-C permite a obtenção de microestruturas variadas em condições de equilíbrio ou de não equilíbrio. O sistema Fe-C possui teores nominais de carbono que variam de 0,05% até 6,67%. Industrialmente, os produtos siderúrgicos são classificados de acordo com o teor de carbono na forma em duas grandes famílias: os aços, com teor de carbono entre 0,05% até 2,20%, que caracteristicamente podem ser trabalhados por deformação a quente e a frio para obtenção das mais variadas formas e dimensões; e os ferros fundidos, com teor de carbono entre 2,20% até 6,67%, que não são passíveis de deformação e cujos produtos finais só podem ser obtidos pelo processo de fundição.

Os aços são as ligas do sistema Fe-C com aplicações abrangentes em segmentos industriais como: construção civil, automotivo, aeronáutico e aeroespacial, petróleo e gás, químico, farmacêutico, biomédico, entre outros. Essa variedade de aplicações se deve à possibilidade de se obter diferentes microestruturas após ciclos térmicos específicos de aquecimento e resfriamento, ou seja, após os tratamentos térmicos. A adição de elementos de liga como manganês, cromo, molibdênio, vanádio, tungstênio etc. amplia as possibilidades de se combinar as propriedades mecânicas, químicas e

físicas nas ligas à base de ferro. As principais famílias de aços utilizados comercialmente são:

- aços-carbono;
- aços para construção mecânica ou para beneficiamento;
- aços inoxidáveis;
- aços ferramenta.

Os ferros fundidos também são passíveis de tratamentos térmicos, e a divisão destes em famílias está relacionada principalmente à presença e à forma da grafita, sendo classificados como: branco, cinzento, nodular e vermicular.

1.2 ALOTROPIA DO FERRO

O ferro é um elemento com reticulado cristalino da forma cúbica. Caracteriza-se esse elemento pelo fato de apresentar o fenômeno de alotropia ou polimorfismo, ou seja, a capacidade de possuir diferentes formas cristalinas cúbicas, como mostra a Figura 1.1. As formas alotrópicas são o ferro cúbico de corpo centrado (CCC) e o ferro cúbico de face centrada (CFC). O ferro cúbico de corpo centrado possui um átomo de ferro em cada vértice do cubo e um átomo no seu centro que correspondem às formas alotrópicas chamadas “delta” (δ) e “alfa” (α). O ferro cúbico de face centrada possui átomos de ferro nos vértices e nos centros das faces do cubo e corresponde à forma alotrópica chamada “gama” (γ).

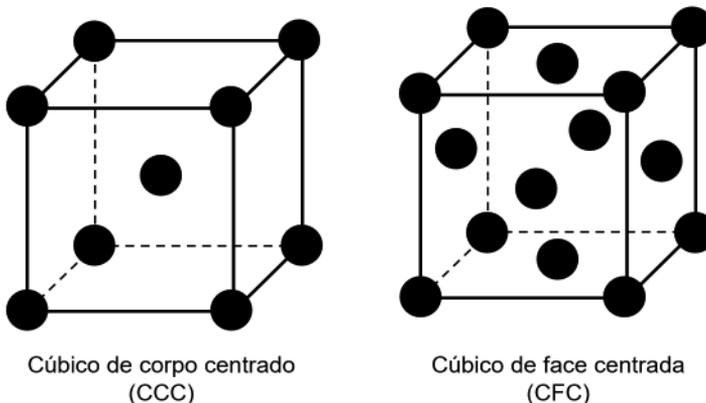


Figura 1.1 – Reticulados cristalinos do ferro. Fonte: adaptada de (1).

A característica mais importante do ferro e de suas ligas são as diferentes formas que seu reticulado cristalino assume com a variação da temperatura, denominadas formas alotrópicas. Isso porque essas formas alotrópicas permitem os diferentes tipos de tratamentos térmicos a serem descritos posteriormente. As mudanças de forma cristalina que acontecem em uma temperatura fixa no ferro puro e em um

intervalo de temperatura em ligas de ferro são acompanhadas de uma variação de energia característica.

A Figura 1.2 mostra esquematicamente as transformações alotrópicas, mudanças de reticulado cristalino, do ferro puro com a temperatura. Os pontos de transformação alotrópica são representados por “A”, correspondendo à palavra do francês “*arrêt*”. No resfriamento se acrescenta a letra “r”, correspondendo ao resfriamento, “*refroidissement*” em francês, e no aquecimento, a letra “c”, “*chauffage*” em francês. A partir do líquido, o ferro se solidifica como ferro com reticulado CCC, chamado delta (δ), que permanece estável até a temperatura de 1.394 °C. Nessa temperatura ocorre a transformação alotrópica para o reticulado CFC, gama (γ), o qual permanece estável até 912 °C, quando o reticulado CFC se transforma em CCC, originando a fase alfa (α), que permanece estável até a temperatura ambiente. As transformações alotrópicas que ocorrem no resfriamento ocorrem de forma inversa no aquecimento. Na temperatura de 770 °C ocorre uma mudança importante de propriedade no ferro, não relacionada à transformação alotrópica. Nessa temperatura o ferro- α sofre uma mudança em seu comportamento magnético, passando de ferromagnético para paramagnético. Esta temperatura é denominada “temperatura Curie”.

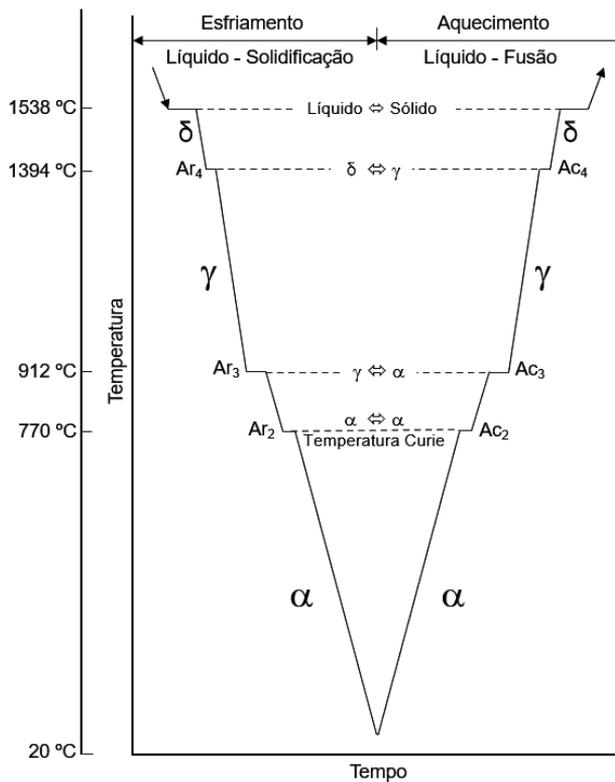


Figura 1.2 - Transformações alotrópicas do ferro. Fonte: adaptada de (1).

A ação da temperatura influencia não apenas a forma alotrópica de equilíbrio, mas também o parâmetro do reticulado cristalino de cada fase e, por consequência, a distância entre os átomos de ferro na célula unitária cúbica, apresentada na Figura 1.3. Esses fatores são importantes para a solubilidade do carbono e dos elementos de liga nas ligas de ferros.

Quando o ferro se apresenta ligado ao carbono, a solubilidade do carbono no ferro varia não apenas com a temperatura, mas também com a estrutura cristalina, forma alotrópica. A estrutura cristalina de baixa temperatura, ferro- α , mantém uma quantidade mínima de carbono em solução sólida, e a estrutura cristalina de alta temperatura, ferro- γ , dissolve quantidades apreciáveis de carbono. Os fenômenos de transformação alotrópica e de variação na solubilidade de carbono determinam importantes transformações de fases que ocorrem no aquecimento e resfriamento das ligas de ferro e que são a base dos tratamentos térmicos. O controle dessas transformações e das microestruturas obtidas é responsável pelas propriedades finais alcançadas nos mais diferentes produtos industriais.

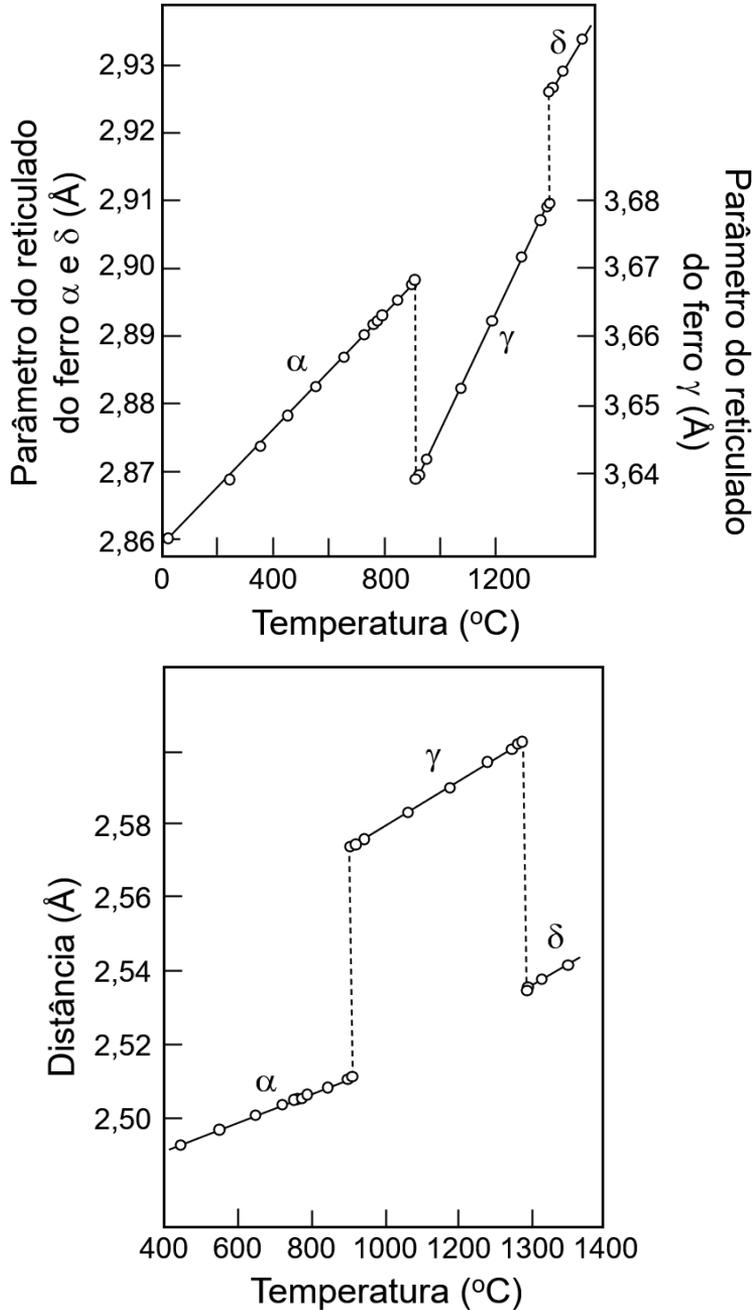


Figura 1.3 – Efeito da temperatura sobre o parâmetro do reticulado do ferro e sobre a distância mínima entre os átomos na célula unitária. Fonte: adaptada de (2).

1.3 DIAGRAMA DE FASES Fe-Fe₃C

O diagrama de fases do sistema Fe-Fe₃C está representado na Figura 1.4. Este diagrama mostra a estabilidade das diferentes fases em função da temperatura e do teor de carbono na liga. Além disso, o diagrama mostra a variação da solubilidade de carbono nos ferros α (CCC) e γ (CFC). As condições de estabilidade das fases e da solubilidade do carbono são a chave para o entendimento das transformações que ocorrem nos tratamentos térmicos. É importante pontuar que esse diagrama de fases só pode ser utilizado para prever transformações em condições de resfriamento próximas do equilíbrio, ou seja, em aquecimento ou resfriamento muito lentos.

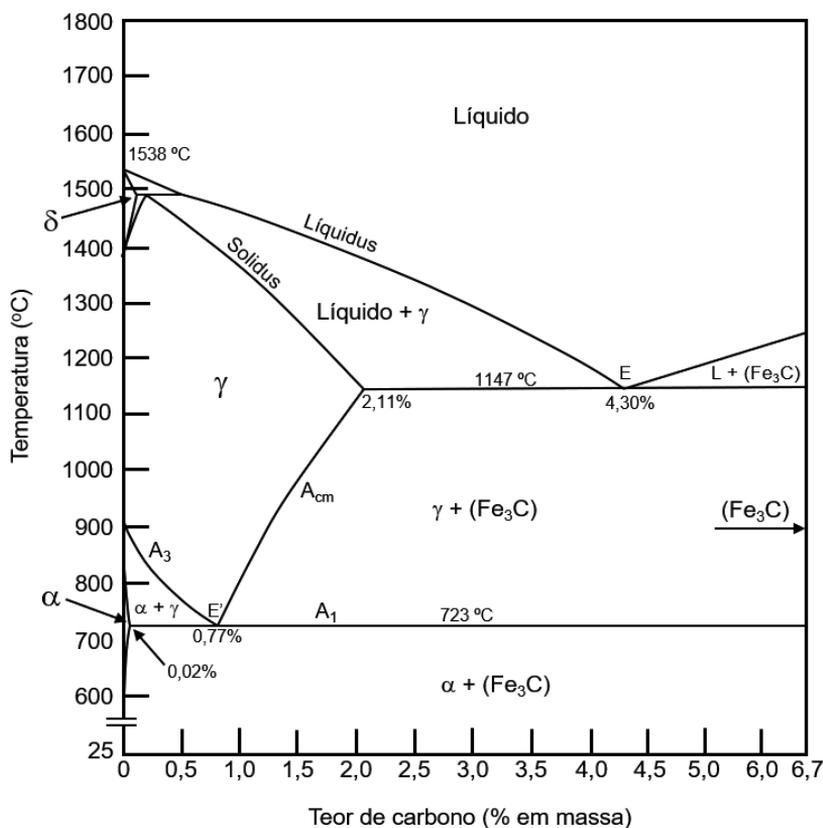


Figura 1.4 – Diagrama de fases Fe-Fe₃C. Fonte: adaptada de (3).

O diagrama de fases Fe-Fe₃C possui campos, linhas e pontos que indicam transformações de fase importantes em função do teor de carbono e da temperatura.

- A linha “*Liquidus*” indica o início da solidificação, e a linha “*Solidus*” indica o final da solidificação. No resfriamento observa-se primeiramente o campo do líquido (L), no qual qualquer quantidade de carbono pode ser dissolvida no ferro.

- Para as soluções sólidas de carbono no ferro observa-se o campo de formação do ferro sólido correspondente à ferrita- δ , um campo amplo de estabilidade da austenita (γ) e um campo restrito, à esquerda, referente à ferrita (α). Para o teor fixo de 6,67%C, uma linha indica a formação do carboneto de ferro, cementita (Fe_3C).
- As linhas A_3 e A_1 delimitam a estabilidade da austenita e indicam sua transformação para ferrita. A linha A_{cm} corresponde ao limite de solubilidade de carbono da austenita e indica o início da precipitação da cementita.
- A cementita é um composto intermetálico com um teor fixo de carbono de 6,67%. A cementita não apresenta reticulado cúbico como a austenita e a ferrita. Seu reticulado é ortorrômbico, com 12 átomos de ferro e 4 átomos de carbono localizados nos interstícios dos átomos de ferro (4).
- O ponto “E: eutético” indica a formação do eutético pela solidificação do líquido em austenita + cementita, ($L \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$), que é denominado “ledeburita”, e o ponto “E’: eutetoide” indica a decomposição da austenita em um agregado constituído de ferrita e cementita, ($\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), que é denominado “perlita”.

Associadas às transformações alotrópicas, as quantidades de carbono que podem ser dissolvidas na austenita e na ferrita são diferentes e variam com a temperatura. A austenita dissolve um teor máximo de 2,11%C na temperatura de 1.147 °C e um teor mínimo de 0,77%C na temperatura de 723 °C. Por sua vez, a ferrita dissolve um teor máximo de 0,02%C na temperatura de 723 °C e um teor insignificante, próximo de 0,008%C, na temperatura ambiente. Esse limite de solubilidade na austenita e na ferrita faz com que ocorra a precipitação do carboneto de ferro “ Fe_3C ”, “cementita”, quando esse limite de solubilidade é excedido pelo efeito da diminuição da temperatura. Aços com teor de carbono inferior ao do ponto E’ (0,77%C) são denominados “aços hipoeutetoides”, e aços com teor de carbono superior ao ponto E’, até 2,11%C, são denominados “aços hipereutetoides”.

No que se refere aos tratamentos térmicos dos aços, as principais transformações de fases estão relacionadas à decomposição da austenita no resfriamento lento, próximo ao equilíbrio termodinâmico. Entre as linhas A_3/A_1 e A_3/A_{cm} existe um equilíbrio de duas fases: “austenita + ferrita” e “austenita + cementita”, respectivamente. No resfriamento dos aços hipoeutetoides a austenita se transforma, primeiramente, entre as temperaturas de A_3 e A_1 , formando a ferrita proeutetoide. No resfriamento dos aços hipereutetoides a austenita se transforma, primeiramente, entre as temperaturas de A_{cm} e A_1 , formando a cementita proeutetoide. Nos aços hipoeutetoides o progresso do resfriamento promove um aumento do teor de carbono da austenita não transformada até o máximo de 0,77% a 723 °C, e para os aços hipereutetoides o resfriamento promove uma diminuição do teor de carbono da austenita até um teor mínimo de 0,77% a 723 °C. Desta forma, a austenita não transformada sempre atinge no resfriamento

abaixo de A_3 e A_{cm} a composição E' do eutetoide ao atingir a temperatura de 723 °C e no resfriamento subsequente será transformada em perlita.

O diagrama Fe-Fe₃C também pode ser utilizado para calcular a fração das fases presentes na microestrutura no resfriamento de equilíbrio. Para os aços, as transformações que ocorrem abaixo da linha A_1 e A_{cm} , até temperatura ambiente, têm sua fração de fases calculada com o uso da regra da alavanca, na forma:

$$\begin{array}{ll} \text{Aços hipoeutetoides} & \text{Aços hipereutetoides} \\ \%ferrita = \frac{C_\gamma - C_o}{C_\gamma - C_\alpha} \times 100 & \%cementita = \frac{C_\gamma - C_o}{C_{Fe3C} - C_\gamma} \times 100 \end{array}$$

em que C_o : composição do aço; C_γ : composição da austenita; C_α : composição da ferrita; e C_{Fe3C} : composição da cementita.

A Tabela 1.1 apresenta o cálculo das frações das fases proeutetoide, ferrita e cementita, e de perlita em uma temperatura logo abaixo de 723 °C. Para os aços hipoeutetoides, verifica-se que o teor de ferrita é máximo para teores de carbono baixos e que à medida que o teor de carbono no aço aumenta a fração de perlita na microestrutura aumenta até o máximo de 100% para a composição eutetoide de 0,77%C. Os aços hipereutetoides têm uma fração muito baixa de cementita proeutetoide e sempre elevada de perlita, principalmente próximo do teor mais utilizado nos aços, de 1,0%C.

Tabela 1.1 – Fração das fases proeutetoide e de perlita em uma temperatura logo abaixo de 723 °C

Aços hipoeutetoides			Aços hipereutetoides		
C_o	% ferrita	% perlita	C_o	% cementita	% perlita
0,15	83,3	16,7	1,00	3,4	96,6
0,20	76,9	23,1	1,50	11,9	88,1
0,25	70,5	29,5	2,00	20,3	79,7
0,30	64,1	35,9			
0,35	57,7	42,3			
0,40	51,3	48,7			
0,60	25,6	74,4			
0,77	0,0	100,0			

A Figura 1.5 apresenta as microestruturas resultantes do resfriamento lento, próximo ao equilíbrio, para aços de composição hipoeutetoide com teor de carbono entre 0,08% e 0,60%. Observa-se que, como previsto pela regra da alavanca, a fração de ferrita diminui e a de perlita aumenta com o aumento do teor de carbono no aço. Para teores de carbono tão baixos quanto 0,08%, a microestrutura é composta de uma matriz ferrítica com partículas isoladas de cementita, e para a composição de 0,60%C a

ferrita encontra-se restrita à região dos contornos de grão e a perlita é a maior fração da matriz.

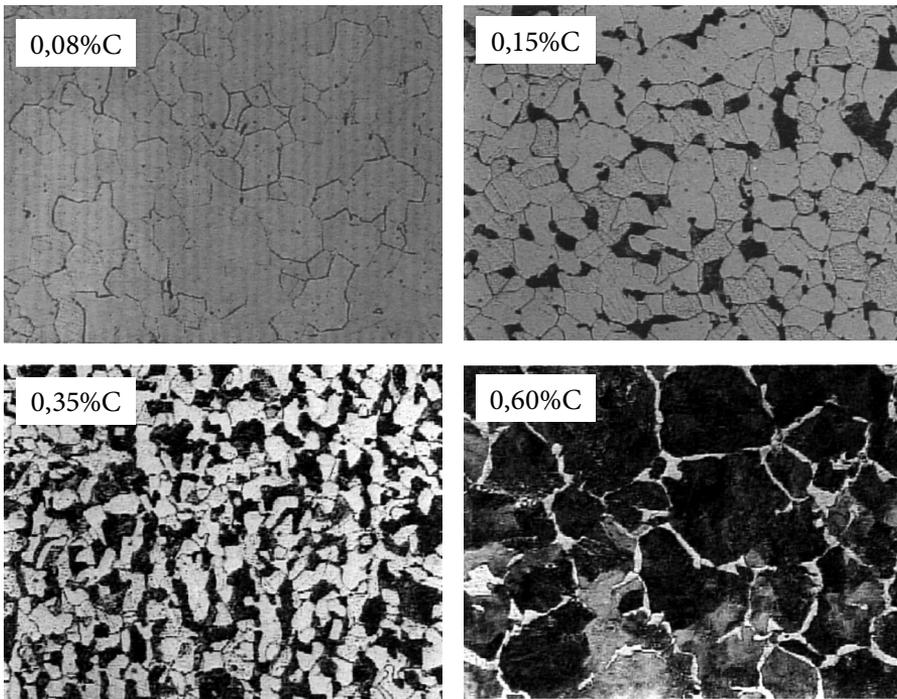


Figura 1.5 – Microestruturas de aços com diferentes teores de carbono. Nital 2%.100x. Fonte: o autor.

Para aços com teor de carbono até 2,11% a austenita não transformada no resfriamento progressivo dentro das zonas críticas (A_3/A_1) e (A_3/A_{cm}) tem seu teor de carbono em equilíbrio com as fases proeutetoides caminhando para a concentração de 0,77%C, que corresponde ao ponto Eutetoide, indicado por E'. No resfriamento, o ponto E' indica o início da formação de um agregado de “ferrita e cementita” e a austenita não transformada até a temperatura de 723 °C com 0,77%C se transforma em “perlita: $\alpha+Fe_3C$ ” ao ultrapassar essa temperatura no resfriamento.

A perlita é constituída de lamelas alternadas de ferrita e cementita formadas pela decomposição Eutetoide da austenita no ponto invariante: 0,77%C e 723 °C. Uma vez formado o núcleo da perlita, constituído de ferrita e cementita, o nódulo cresce por um mecanismo de ramificação de forma acoplada e cooperativa, de modo a manter o equilíbrio químico na frente de crescimento, como representado esquematicamente na Figura 1.6. A Figura 1.7 apresenta a microestrutura de um aço eutetoide, constituída exclusivamente de perlita, em que se observam nitidamente as lamelas de cementita (escuras) e de ferrita (claras).

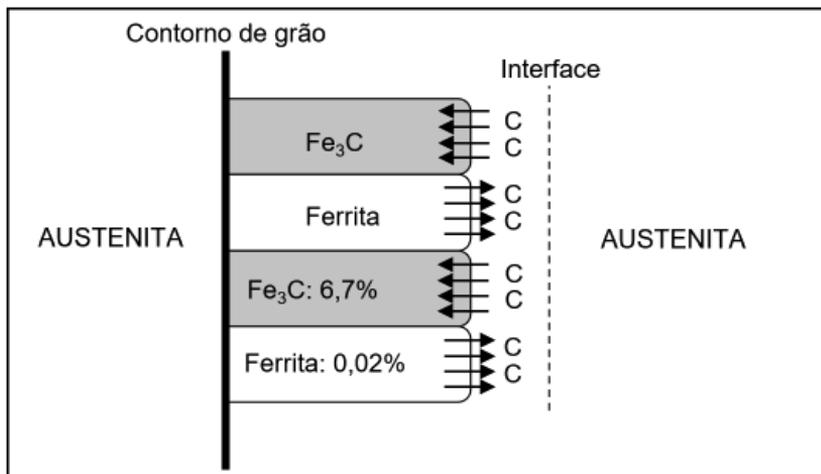


Figura 1.6 – Representação esquemática do crescimento da perlita a partir do contorno de grão austenita/austenita. Fonte: o autor.

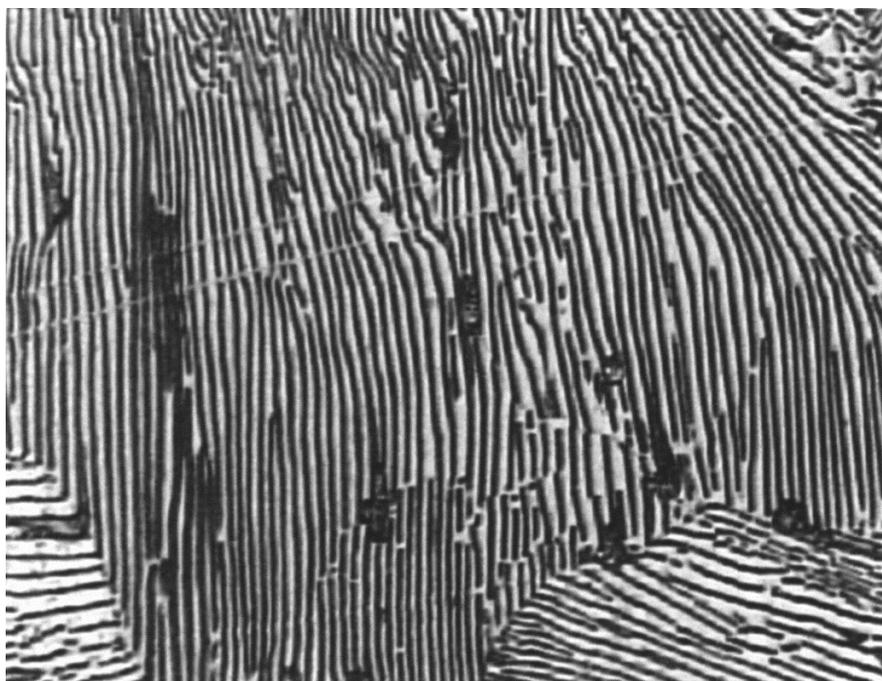


Figura 1.7 – Microestrutura da perlita na composição eutetoide. Nital 2%. 500x. Fonte: o autor.

As propriedades das fases obtidas em condições de resfriamento lento estão indicadas na Tabela 1.2. A ferrita é muito dúctil, “mole”, e com resistência mecânica relativamente baixa. A cementita é um carboneto, uma fase cerâmica, e por isso muito dura e frágil. A perlita apresenta, na média, as melhores propriedades, embora nela

esteja presente 11,5% de cementita. Contudo, a combinação dos dois constituintes da perlita, ferrita e cementita, altera o comportamento da perlita sob o ponto de vista da resistência mecânica, a qual, ao contrário do que se poderia esperar, aumenta desde que a quantidade de cementita não ultrapasse a porcentagem mais ou menos correspondente à do eutetoide. A Tabela 1.3 mostra a variação das propriedades dos aços em função do teor de carbono e, portanto, com a fração de ferrita, cementita e perlita presente na microestrutura.

Tabela 1.2 – Propriedades mecânicas dos microconstituintes dos aços (5)

Constituinte	Limite de resistência à tração		Alongamento em 2" (%)	Dureza Brinell (HB)
	(kg/mm ²)	(MPa)		
Ferrita	35	340	cerca de 40	90
Perlita	85	830	cerca de 10	250-300
Cementita	3	30	0	650

Tabela 1.3 – Propriedades mecânicas de aços resfriados lentamente em função do teor de carbono (6)

Carbono %	Limite de escoamento		Limite de resistência		Alongamento em 2" (%)	Estricção (%)	Dureza Brinell (HB)
	kgf/mm ²	MPa	kgf/mm ²	MPa			
0,01	12,5	125	28,5	275	47	71	90
0,20	25,0	250	51,5	405	37	64	115
0,40	31,0	300	52,5	515	30	48	145
0,60	35,0	340	67	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	35,0	340	69,5	685	19	25	215

As linhas de transformação do diagrama Fe-Fe₃C (Figura 1.4) correspondem a uma posição média das transformações de fase e sofrem uma pequena modificação em sua posição de acordo com as condições de aquecimento ou resfriamento do aço. A Figura 1.8 mostra que as linhas A₁, A₃ e A_{cm} são deslocadas para cima no aquecimento, sendo indicadas por Ac₁, Ac₃ e Ac_{cm} com a adição da letra “c”, correspondente ao francês “*chauffage*”. No resfriamento, as linhas são indicadas por Ar₁, Ar₃ e Ar_{cm} com a adição da letra “r”, correspondente ao francês “*refroidissement*”. Contudo, essa diferença não afeta a prática dos tratamentos térmicos dos aços quando se objetiva aquecer e resfriar para obter as fases previstas pelo diagrama.

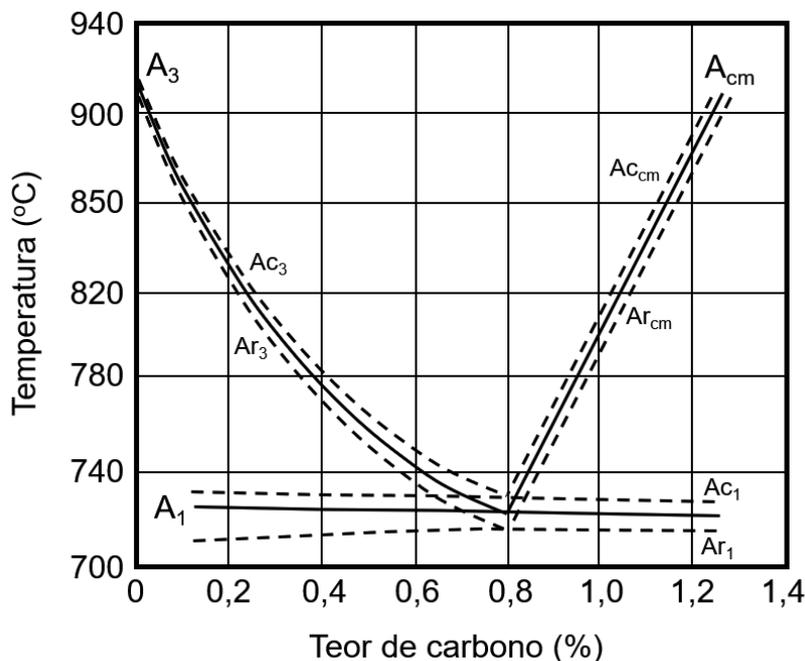


Figura 1.8 – Efeito do resfriamento e do aquecimento nas temperaturas de transformação alotrópica. Fonte: adaptada de (7).

1.4 EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA NO SISTEMA FE-C

Os aspectos abordados anteriormente com relação ao sistema Fe-Fe₃C consideravam apenas o sistema de liga ferro e carbono. Entretanto, a maioria das ligas ferrosas utilizadas em componentes industriais possui, além do Fe e do C, elementos adicionais que proporcionam uma melhor resposta aos ciclos de tratamento térmico e permitem obter microestruturas com propriedades variadas e de especial importância para os diversos segmentos industriais. Esses elementos adicionados à composição base Fe-C são chamados de elementos de liga, e os principais são: manganês (Mn), níquel (Ni), cromo (Cr), molibdênio (Mo), vanádio (V), tungstênio (W), nióbio (Nb), entre outros.

Quando os elementos de liga são adicionados ao sistema base Fe-C, a primeira modificação ocorre no equilíbrio de fases, ou seja, na estabilidade da austenita e da ferrita. Como a maioria dos tratamentos térmicos utiliza as transformações de decomposição da austenita, é importante conhecer como o campo desta fase se modifica com a adição dos elementos de liga. Os elementos de liga podem influenciar no campo de estabilidade da austenita de duas formas:

- Expandindo o campo de estabilidade da austenita de maneira que esta seja formada para limites mais amplos de composição. Esses elementos

são chamados de “estabilizadores da austenita”. Os principais elementos estabilizadores da austenita são o níquel, o manganês e o nitrogênio.

- Contraindo o campo de estabilidade da austenita de forma que a estabilidade da ferrita seja favorecida. Esses elementos são chamados de “estabilizadores da ferrita”. Os principais elementos estabilizadores da ferrita são o cromo e o silício.

Em consequência, com a adição dos elementos de liga, os diagramas de fases das ligas à base de ferro sofrem modificações com relação ao sistema ferro-carbono simples, como ilustrado na Figura 1.9. Os diagramas do “Tipo A” referem-se aos elementos de liga chamados “estabilizadores da austenita”, e os diagramas do “Tipo B” referem-se aos elementos de liga estabilizadores da ferrita. De forma que:

- **Tipo A-I:** do tipo “campo γ -aberto”, compreende os elementos de liga que ampliam a faixa de temperatura para austenita estável, resultando em rebaixamento de transformação gama-alfa e elevação da temperatura de transformação gama-delta. Entre esses elementos situam-se o manganês, o níquel e o cobalto.
- **Tipo A-II:** do tipo “campo γ -expandido”, carbono e nitrogênio são os elementos mais importantes para expandir o campo de estabilidade da austenita, tornando-a mais estável.
- **Tipo B-I:** do tipo “campo γ -fechado”, compreende os elementos de liga que diminuem a estabilidade da austenita, até fazê-la praticamente desaparecer. Esse é o efeito dos elementos estabilizadores da ferrita, e os mais importantes são: silício, cromo, molibdênio, vanádio, titânio e alumínio.
- **Tipo B-II:** do tipo “campo γ -contraído”, além da diminuição na estabilidade da austenita, também são formados compostos intermetálicos ou constituintes outros que não soluções sólidas de ferro gama e ferro alfa. Exemplos: tântalo, zircônio, boro, enxofre e nióbio.

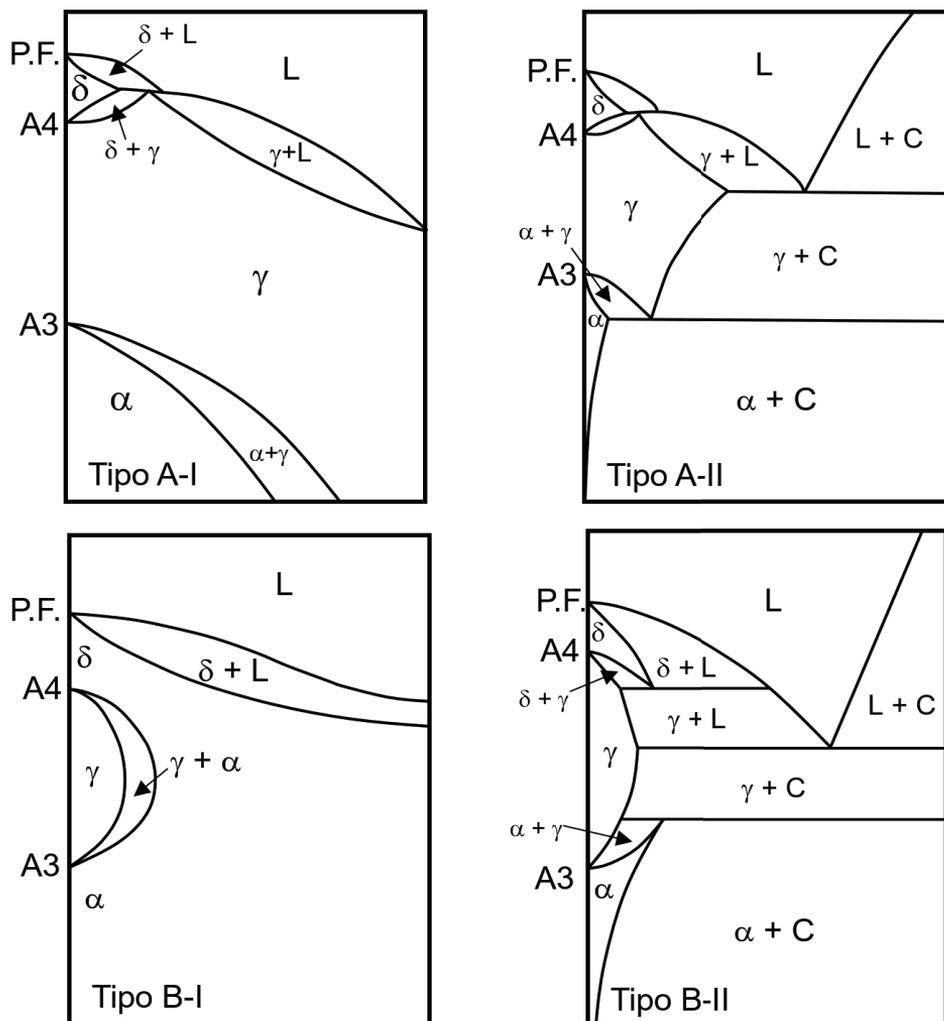


Figura 1.9 – Diagramas de fase formados com a adição dos elementos de liga. Tipo A-I: campo γ -aberto, Tipo A-II: campo γ -expandido, Tipo B-I: campo γ -fechado e Tipo B-II: campo γ -contraído. Fonte: adaptada de (8).

A adição de elementos de liga também afeta significativamente as condições de decomposição eutetoide da austenita para a formação da perlita, que no sistema Fe-C simples ocorre para 0,8% C a 723 °C. Esses elementos alteram a temperatura e o teor de carbono nos quais a transformação eutetoide ocorre. Os elementos estabilizadores de austenita diminuem a temperatura eutetoide, ampliando o campo da austenita, e os elementos estabilizadores de ferrita aumentam a temperatura eutetoide, restringindo o campo da austenita. O efeito dos elementos de liga sobre o teor de carbono e a temperatura do eutetoide e sobre o campo austenítico são mostrados nas Figuras 1.10 e 1.11 (9).

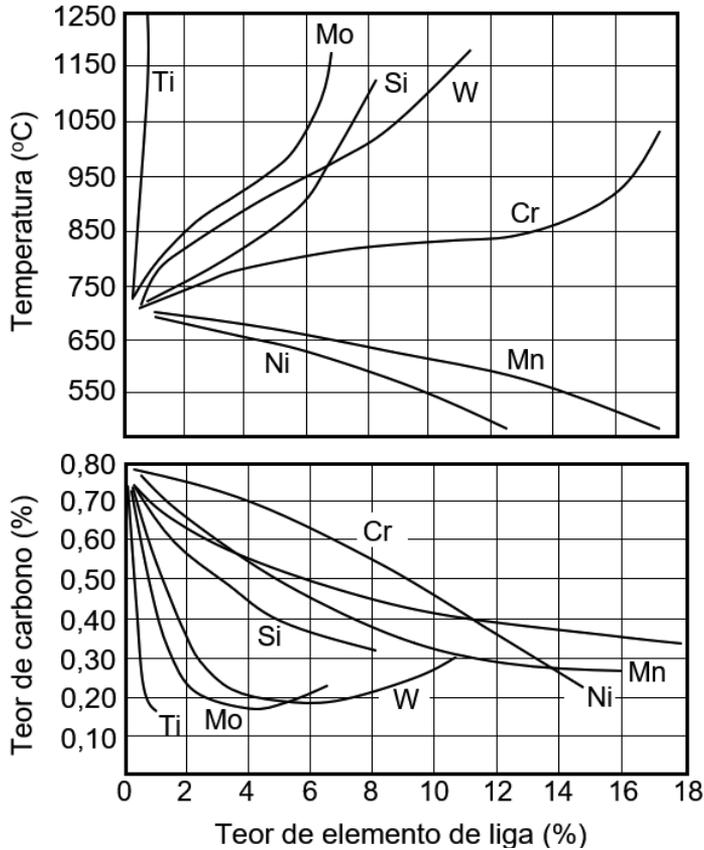


Figura 1.10 – Efeito dos elementos de liga sobre o teor de carbono e a temperatura de transformação eutetoide.
Fonte: adaptada de (9).

Uma influência importante dos elementos de liga adicionados ao sistema Fe-C é a capacidade de formação de compostos como os carbonetos, nitretos e outros intermetálicos. Estes compostos participam de forma determinante em diferentes mecanismos de endurecimento presentes nos tratamentos térmicos e superficiais. Geralmente, esses elementos se dissolvem de forma extensa na austenita e possuem baixa solubilidade na ferrita, o que promove sua precipitação em diferentes condições de processo. A Tabela 1.4 mostra as principais características desses elementos.

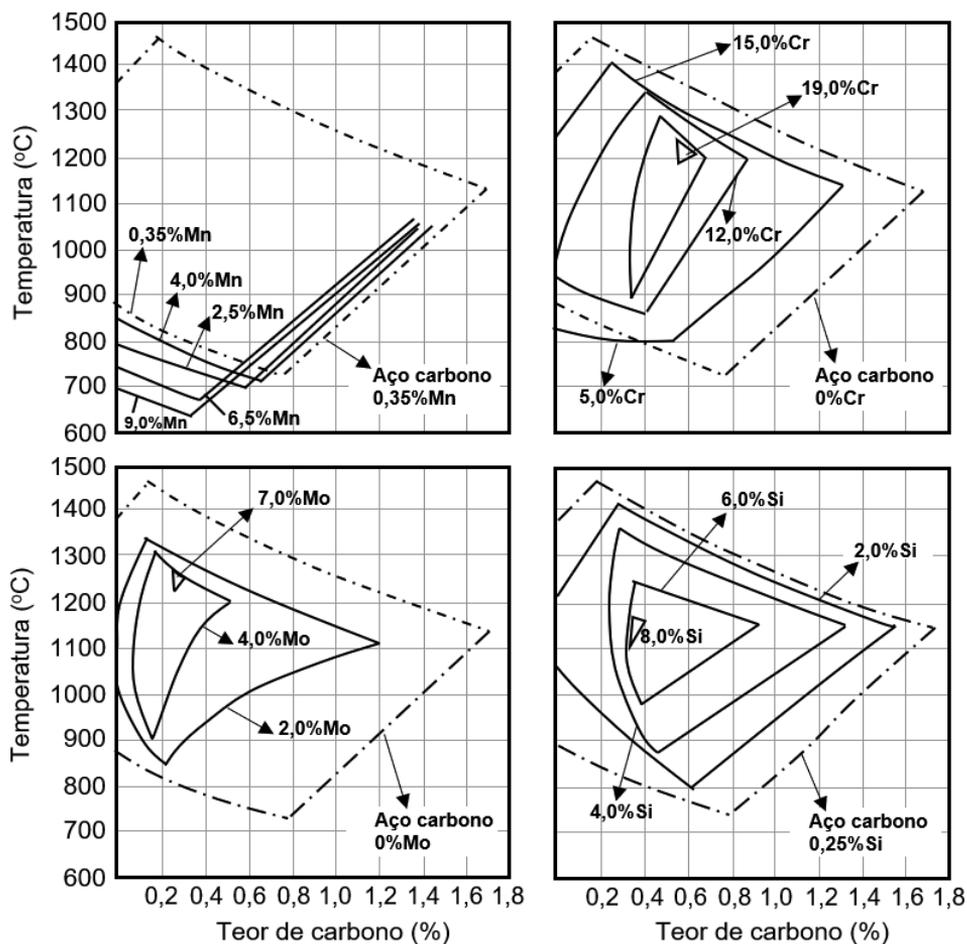


Figura 1.11 – Efeito dos elementos de liga sobre a estabilidade do campo austenítico. Fonte: adaptada de (9).

Tabela 1.4 – Tendência de combinação dos elementos de liga no aço (9)

Elementos de liga	Combinados na forma de carbonetos	Combinados na forma de compostos intermetálicos
Alumínio (Al)	-----	AlN
Cromo (Cr)	Moderada ($Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3)	CrN, Cr_2N
Tungstênio (W)	Moderada (WC , W_2C)	
Molibdênio (Mo)	Moderada (Mo_2C , Mo_6C)	Mo_2N
Vanádio (V)	Forte (VC)	VN
Titânio (Ti)	Forte (TiC)	TiCN, TiN
Nióbio (Nb)	Forte (NbC)	NbN, Nb_2N

REFERÊNCIAS

- (1) K.-E. Thelning. *Steel and Its Heat Treatment*. 2. ed. London: Butterworth, 1984.
- (2) W. Hume Rothery. *Estrutura das ligas de ferro*. São Paulo: Edgard Blücher, 1968.
- (3) *ASM Handbook*. Volume 1. Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. Ohio: ASM International, 1993.
- (4) L. H. Van Vlack. *Princípios de Ciência e Tecnologia de Materiais*. 4. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984.
- (5) J. Chipman. *Metallography, Structure and Phase Diagrams*. 8. ed. Ohio: ASM International, 1973.
- (6) G. Guzzoni. *Gli Acciai Comuni e Speciali*. Vol. 1. Milão: Ulrico Hoepli, 1966.
- (7) V. Chiaverini. *Aços e ferros fundidos*. 7. ed. São Paulo: ABM, 1996.
- (8) H. K. D. H. Bhadeshia, R. W. K. Honeycombe. *Steels Microstructure and Properties*. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- (9) E. C. Bain, H. W. Paxton. *Alloying Elements in Steel*. 2. ed. Ohio: ASM International, 1961.