



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

MARIA FILOMENA LEITÃO VASCONCELOS

**ESTUDO DOS EFEITOS DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA NA
MICROESTRUTURA DOS AÇOS CARBONO, AÇOS BAIXA LIGA E AÇOS ALTA
LIGA.**

**FORTALEZA
2018**

MARIA FILOMENA LEITÃO VASCONCELOS

ESTUDO DOS EFEITOS DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA NA
MICROESTRUTURA DOS AÇOS CARBONO, AÇOS BAIXA LIGA E AÇOS ALTA
LIGA.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.
Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso.

FORTALEZA
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L549e Leitão Vasconcelos, Maria Filomena.
 Estudo dos efeitos dos principais elementos de liga nos aços carbono, aços baixa liga e aços alta liga. /
 Maria Filomena Leitão Vasconcelos. – 2018.
 50 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
 Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2018.
 Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.
 Coorientação: Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso.
1. Aço carbono. 2. Aço baixa liga. 3. Normalização. I. Título.

CDD 669

MARIA FILOMENA LEITÃO VASCONCELOS

ESTUDO DOS EFEITOS DOS PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA NA
MICROESTRUTURA DOS AÇOS CARBONO, AÇOS BAIXA LIGA E AÇOS ALTA
LIGA.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso (Co-orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

À minha mãe, Rosa.

Aos meus avós, Medeiros e Verônica.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre cuidou e indicou o caminho certo a seguir nessa jornada.

À minha mãe, Rosa Candida, que sempre se dedicou a me ensinar que as conquistas na vida requerem esforços e dedicação, sempre com honestidade.

Aos meus avós, Medeiros e Verônica (*in memoriam*), que com amor me formaram como neta, filha e pessoa, dando todo o suporte para alcançar meus objetivos.

Ao meu irmão e padrasto, João e Renato, pelos momentos de apoio e paciência

A todos os meus amigos da UFC, em especial aos que dividiram momentos de descobertas, amadurecimento, desesperos de noites em claro estudando para as provas, e, principalmente, aos que me apoiaram e vibraram com minhas conquistas ao longo dessa jornada: Dyego Almeida, Francisco Olímpio, Fábio Gomes, Caio Ítalo, Carlos Viana, Andrey Sindeaux, Dário Freire, Nilis Cunha, Davi Marques, Ana Beatriz Pinho, Aldery Nogueira e outros.

Ao Professor, Coordenador e Orientador Dr. Marcelo José, por todo ensinamento, paciência e compreensão, sempre se mostrando um profissional solícito e humano.

Ao Prof. Dr. Jorge Luiz, por toda a ajuda, paciência, dedicação e palavras de apoio ao longo desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Walney Araújo, por todos os momentos de ensinamentos, cuidado e conversas, me motivando a buscar sempre meus objetivos da melhor forma.

Ao Prof. Dr. Cleiton Carvalho, por ser sempre um exemplo de profissional e homem íntegro que ama o que faz, sempre compartilhando todo seu imensurável conhecimento.

À Prof. Dra. Janaína Machado, por ter despertado em mim o amor à Siderurgia, pelos momentos de conversa, apoio e cuidado.

Ao CNPQ, por ter financiado durante um ano e meio meus estudos na Austrália.

À Western Australia School of Mines, por ter me acolhido e contribuído para meu crescimento como Engenheira Metalurgista.

Aos meus amigos que estiveram me apoiando, encorajando e acreditando em mim quando eu mesmo não acreditava, com palavras de motivação durante esse último semestre: Lia Ribeiro, Beatriz Andrade, Nágila Fontenele, Livia Andrade, Thais Alexandrino, Barbara Campos, Matheus Santos, Gabriel Coelho, Lícia Martins, Lucas Thé, Nicole Diniz e outros.

Ao Dr. Luis Flávio Herculano, pela ajuda e apoio ao longo desse trabalho.

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) e todos que o integram, pelo espaço, equipamentos e materiais.

“Ama-se mais o que se conquista com esforço.”
(Benjamin Disraeli)

RESUMO

Os aços, dentre as ligas metálicas, apresentam a combinação de propriedades mais úteis às aplicações da engenharia, sendo, portanto, necessário um profundo entendimento da microestrutura desses materiais, a qual é altamente afetada pela composição química, pelo processo de fabricação e pelos tratamentos térmicos, químicos e/ou mecânicos a que esses aços foram submetidos. Juntamente com a geometria do componente fabricado, a microestrutura dita as propriedades desses materiais sob determinadas condições de trabalho. Visto que as microestruturas e, conseqüentemente, as propriedades dos aços são alteradas com a composição química, o principal objetivo do estudo é analisar e comparar a influências dos principais elementos de liga do *Ultra Low Carbon*, AISI 1010, AISI 1040, AISI 1080, AISI 4340, E2 (9Cr-7Mo) e ASTM 2205 na microestrutura desses aços fazendo o uso da técnica de Microscopia Ótica. Foi observado que para os aços carbono *Ultra Low Carbon*, AISI 110, AISI 1040 e AISI 1080 submetidos ao tratamento térmico de normalização, o teor de carbono é o principal fator que altera a microestrutura desses aços, isto é, a medida que se eleva o teor de carbono, diminui-se o teor de ferrita pró-eutetóide e aumenta-se o de perlita, variando de uma matriz praticamente 100% ferrítica nos *Ultra Low Carbon* até uma matriz 100% perlítica no AISI 1080. Já para o AISI 4340 normalizado, foi possível perceber que a adição de baixos teores de Ni, Cr e Mo não afetou consideravelmente a microestrutura em relação ao AISI 1040, porém, houve a formação de uma pequena quantidade de um microconstituente não presente no AISI 1040, o qual não foi possível identificar com a técnica utilizada nesse estudo. Verificou-se, por fim, a influência dos elevados teores do Cr e Mo na microestrutura do aço E2 (9Cr-7Mo) como recebido, a qual é composta por uma matriz ferrítica com pequenos precipitados, visto que esses elementos químicos são estabilizadores da ferrita à temperatura ambiente. Também foi observado a influência dos altos teores de Cr e Mo combinado com elevado teor de Ni, o qual estabiliza austenita à temperatura ambiente, no ASTM 2205 como recebido, gerando uma microestrutura composta por uma combinação de ferrita e austenita em frações aproximadamente iguais. Em geral, o presente estudo apresenta a micrografia ótica dos aços citados a fim de demonstrar o efeito dos elementos de liga na microestrutura desses materiais.

Palavras-chaves: Aço carbono, Aço baixa liga, normalização.

ABSTRACT

Among the metallic alloys, the steel presents a combination of properties most useful to the engineering applications, therefore, a deep understanding of the microstructure of these materials is required, which is highly affected by the chemical composition, the manufacturing process and the thermal, chemical and/or mechanical treatments to which these steels were subjected. Together with the geometry of the manufactured component, the microstructure dictates the properties of these materials under certain working conditions. Since the microstructure and consequently the properties of the steels are altered with the chemical composition, the main objective of the study is to analyze and compare the influence of the main alloying elements of Ultra Low Carbon, AISI 1010, AISI 1040, AISI 1080, AISI 4340, E2(9Cr-7Mo) and ASTM 2205 in the microstructure of these steels using the technique of Optical Microscopy. It was observed that for the carbon steels Ultra Low Carbon, AISI 1010, AISI 1040 and AISI 1080 subjected to the normalization treatment, the carbon content is the main factor that changes the microstructure of these materials, which means, as the carbon content increases, the pro-eutectoid ferrite content decreases and the pearlite content increases, ranging from an almost 100% ferritic matrix in Ultra Low Carbon to a 100% pearl matrix in AISI 1080. However, for the AISI 4340 normalized, it was possible to notice the addition of a low content of Ni, Cr and Mo did not affect considerably the microstructure in relation to the AISI 1040, but it was formed a small amount of a micro constituent that was not present in the AISI 1040, which could not be identified by the technique used in this study. Finally, it was verified the influence of a high content of Cr and Mo on the steel E2 (9Cr-7Mo) microstructure as received, which is composed by a ferritic matrix with small precipitates, since these chemical elements are ferrite stabilizer at room temperature. It was also observed the influence of a high content of Cr and Mo combined with a high Ni content, which stabilizes austenite at room temperature in the ASTM 2205 as received, generating a combination of ferrite and austenite in approximately equal fractions in this steel microstructure. In general, the present study presents the optical micrograph of the cited steels in order to demonstrate the effect of the alloying elements on the microstructure of these materials.

Keywords: Carbon Steel, low-alloy steel, normalizing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Interação entre os critérios de classificação dos aços.	4
Figura 2 – Designação dos aços segundo a norma ABNT.	5
Figura 3 – Classificação dos aços carbono e dos aços de baixa liga pela norma ABNT	5
Figura 4 – Diagrama de equilíbrio para o sistema ferro-carboneto de ferro.	8
Figura 5 – Superposição dos diagramas de transformação isotérmica e de transformação por resfriamento contínuo para uma liga ferro-carbono com composição eutetóide.....	9
Figura 6 – Diagrama de Schaeffler para os aços inoxidáveis.....	9
Figura 7 – Transformação alotrópica do ferro.	10
Figura 8 – Transformações possíveis envolvendo a decomposição da austenita.	11
Figura 9 – Representação esquemática da transformação da austenita em ferrita em condições próximas ao equilíbrio.	12
Figura 10 – Diagrama esquemático da formação de uma colônia de perlita nucleada a partir de um contorno de grão da austenita.	13
Figura 11 - Esquema das morfologias mais comuns.	14
Figura 12 – Efeito do teor de carbono na espessura das ripas de martensita.	15
Figura 13 – Crescimento de placas de martensita com incremento do resfriamento abaixo de M_s a) crescimento da placa de martensita interrompido pelo contorno de grão da austenita b) propagação da martensita	16
Figura 14 – Tipos de diagrama de equilíbrio para o sistema ferro-elemento de liga.	18
Figura 15 – Curvas TTT dos aços (a)AISI 1006 e (b)AISI 1020.	19
Figura 16 – Curvas TTT dos aços (a)AISI 1045 e (b)AISI 1045+Cu	19
Figura 17 – Curvas TTT dos aços (a)AISI 1045 e (b)AISI 4340	19
Figura 18 – Tipos de tratamentos térmicos dos aços.	20
Figura 19 – Faixas de temperatura recomendadas para o tratamento térmico de aços ao carbono, superpostas ao diagrama de equilíbrio de fases metaestável Fe-C.....	21
Figura 20 – Diagrama esquemático de transformação para normalização.	21
Figura 21 – Diagrama esquemático de transformação para normalização, comprovando a possibilidade de obtenção do constituinte bainita.	22
Figura 22 – Micrografia ótica no estado normalizado do <i>Ultra Low Carbon</i> (a)100x e (b)500x. Ataque químico: Nital 2%.	27
Figura 23 – Micrografia ótica no estado normalizado do AISI 1010 (a)200x e (b) 500x. Ataque químico: Nital 2%.	28

Figura 24 – Micrografia ótica no estado normalizado do AISI 1040 (a)200x e (b) 500x. Ataque químico: Nital 2%.....	29
Figura 25 – Micrografia ótica no estado normalizado do AISI 1080 (a)200x e (b)500x. Ataque químico: Nital 2%.....	29
Figura 26 – Micrografia ótica no estado normalizado do AISI 4340 (a)200x e (b)500x. Ataque químico: Nital 2%.....	31
Figura 27 – Micrografia ótica no estado como recebido do E2(9Cr-7Mo) (a)200x e (b)500x. Ataque químico: Nital 2%.	32
Figura 28 – Micrografia ótica no estado como recebido do ASTM 2205 (a)100x e (b)200x. Ataque eletroquímico: Ácido nítrico 40%.	33

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos aços ferríticos e dúplex.....	7
Tabela 2 – Classificação dos elementos estabilizadores da austenita e estabilizadores da ferrita.	17
Tabela 3– Composição química das amostras via Espectrômetro de Emissão Ótica.	24
Tabela 4 – Composição química nominal do AISI 4340.....	24
Tabela 5 – Tratamento térmico de normalização nas amostras de aço carbono e de baixa liga.	25
Tabela 6 – Reagentes utilizados para revelar a microestrutura das amostras.....	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – “American Society for Testing and Materials”

NBR – Normas Brasileiras

AISI – “American Iron and Steel Institute”

SAE – “Society of Automotive Engineers”

CCC – Cúbico de Corpo Centrado

CFC – Cúbico de Face Centrada

TCC – Tetragonal de Corpo Centrado

C – Carbono

Mn – Manganês

P – Fósforo

S – Enxofre

Ni – Níquel

Cr – Cromo

Mo – Molibdênio

Si – Silício

Cu – Cobre

Nb – Nióbio

Al – Alumínio

γ – Austenita

δ – Ferrita Delta

α - Ferrita Alfa

μ - Fase Mu

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo Geral.....	2
2.2 Objetivos Específicos	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Aços	3
3.2 Classificação dos aços	3
3.2.1 Aço Carbono e Aço de Baixa Liga.....	4
3.2.2 Aços de Alta Liga.....	6
3.3 Microestrutura dos aços.....	7
3.3.1 Constituintes estruturais dos aços.....	10
3.3.1.1 Austenita	10
3.3.1.2 Ferrita	11
3.3.1.3 Cementita	12
3.3.1.4 Perlita	12
3.3.1.5 Bainita.....	13
3.3.1.6 Martensita	14
3.3.2 Influência dos elementos de liga na microestrutura dos aços	16
3.4 Tratamentos térmicos.....	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 Materiais.....	23
4.2 Tratamentos Térmicos	25
4.3 Metalografia	25
4.4 Microscopia Ótica.....	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5.1 Influência do carbono na microestrutura do <i>Ultra Low Carbon</i> , AISI 1010, AISI 1040 e AISI 1080	27
5.2 Influência da presença de Ni, Cr e Mo em baixo teores na microestrutura do aço baixa liga AISI 4340	30

5.3 Influência do Ni, Cr e Mo em altos teores na microestrutura dos aços alta liga E2(9Cr-7Mo) e ASTM 2205.....	31
6 CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

O aço é um material que proporcionou avanços significativos para a sociedade em variados ramos, como na construção civil, indústria automobilística, aeronáutica e petroquímica, as quais solicitam materiais detentores de propriedades mecânicas, químicas e físicas necessárias para o desenvolvimento de componentes que atendam as condições operacionais que lhe são impostas. Dentre as várias ligas ferrosas requisitadas para desempenhar essas importantes funções estão os aços carbono, aços de baixa liga e aços inoxidáveis, cujas propriedades variam de acordo com a composição química da liga e tratamentos térmicos e/ou mecânico a que são submetidos.

Os aços carbono são ligas metálicas constituída de ferro, carbono e elementos residuais em baixos teores, sendo o carbono o principal elemento de liga que influencia nas propriedades do material e cuja composição não ultrapassa 2,11%. Normalmente, esse tipo de aço é subdividido com relação a quantidade de carbono em aço baixo (<0,3%C), médio (0,3-0,5%C) e alto (0,5-2,11%C) carbono (CHIAVERINI, 2005).

Os aços classificados como aços de baixa liga são aqueles em que a presença dos elementos residuais está acima dos valores considerados normais, ou há a adição de outros elementos de liga, cujo teor não exceda aproximadamente 3.5%p, com o intuito de melhorar as propriedades desses aços (CHIAVERINI, 2005).

Os aços inoxidáveis apresentam em sua composição teores de cromo acima de 12%, o que garante a esses materiais uma excelente resistência à oxidação e à corrosão. Eles são agrupados em cinco categorias: martensítico, ferrítico, austenítica, dúplex e endurecidos por precipitação (COLPAERT, 2008).

O desenvolvimento desses diferentes tipos de aços foi possibilitado devido ao aprofundamento no conhecimento e controle da microestrutura dessas ligas ferrosas, fazendo-se uso de técnicas de preparação de amostras e de micrografia para identificar e compreender detalhadamente as características da microestrutura desses materiais, como o tipo e a quantidade das fases presentes, tamanho e orientação dos grãos, contornos de grão e inclusões, e, assim, ser capaz de determinar as propriedades que se espera que o material possua tendo em vista a identificação e compreensão desses variados detalhes. E, por esse motivo, a importância de reconhecer e distinguir as distintas microestruturas dos diferentes tipos de aços.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência dos principais elementos de liga na microestrutura dos aços carbono, aços de baixa liga e aços alta liga.

2.2 Objetivos Específicos

Realizar análises de composição química das ligas *Ultra Low Carbon*, AISI 1010, AISI 1040, AISI 1080, E2 (9Cr-7Mo) e ASTM 2205.

Analisar e comparar o efeito do carbono em diferentes teores na microestrutura dos aços carbono *Ultra Low Carbon*, AISI 1010, AISI 1040, AISI 1080.

Analisar o efeito dos elementos de liga Ni, Cr e Mo em baixos teores na microestrutura do aço AISI 4340 em comparação com a microestrutura do AISI 1040.

Analisar e comparar a influência dos elevados teores dos elementos de liga Cr, Ni e Mo na microestrutura dos aços alta liga E2 (9Cr-7Mo) e ASTM 2205.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços

O aço pode ser definido como uma liga ferro-carbono apresentando geralmente de 0.008%p até aproximadamente 2.11%p de carbono em sua composição, além de elementos residuais presentes devido ao processo de fabricação, como fósforo, enxofre, manganês e silício, e elementos secundários adicionados propositalmente em diferentes proporções a fim de se obter aços com propriedades necessárias à sua aplicação, por exemplo, cromo, níquel, molibdênio e vanádio (CHIAVERINI, 2005).

De acordo com Chiaverini (1954), os aços são, dentre as ligas metálicas, as que apresentam combinações de propriedades mais úteis para as aplicações da engenharia e diferenciam-se entre si por sua composição química e também pelo formato, uniformidade e tamanho dos grãos que os compõem. O conjunto dessas características é o que dita quais as principais propriedades de determinado aço.

De forma geral, os aços possuem excelentes propriedades mecânicas: boa resistência à tração, à compressão, à flexão, e como é um material homogêneo, pode ser laminado, forjado, estampado, estriado. Além disso, diversas propriedades, como a dureza, ainda podem ser alteradas ao submeter essas ligas a tratamentos térmicos, químicos ou mecânicos (FERRAZ, 2003).

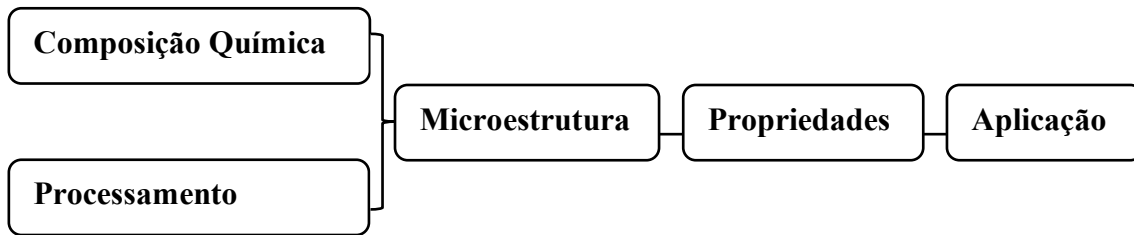
3.2 Classificação dos aços

Segundo Silva e Mei (2010), uma vez que há uma grande variedade de aços, foram criados sistemas para classificá-los baseados em suas características, como composição química, processo de acabamento, forma do produto acabado, empregabilidade, dentre outros critérios. Além disso, essas formas de classificação estão relacionadas visto que o processo de fabricação e a composição determinam a microestrutura do material obtido, a qual, juntamente com a geometria do objeto e certas variáveis do meio em que será empregado, define as propriedades e o campo de aplicação desse material (Figura 1).

Dentre os sistemas de classificação, o mais generalizado é o que considera a composição química dos aços, servindo como base para o sistema adotado no Brasil – Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (Norma Brasileira – NBR 6006), o qual é basicamente o mesmo utilizado pelas americanas *American Iron and Steel Institute* (AISI) e

pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), sendo eles os sistemas em vigor mais conhecidos e utilizados que designam os aços por letras e números. Além desses sistemas, *American Society for Testing and Materials* (ASTM) é outro bastante utilizado na classificação dos aços (SILVA e MEI, 2010; CHIAVERINI, 2005; CHIAVERINI, 1954).

Figura 1 – Interação entre os critérios de classificação dos aços.



Fonte: Adaptação do Callister (2006).

Segundo a norma ABNT, os aços são divididos em dois grandes grupos de maneiras distintas: 1) Aço carbono e aço de baixa liga; 2) Aço de alta liga.

Outra classificação bastante usual é a que leva em consideração o teor de carbono dos aços, denominando-os como aços hipoeutetóide (<0.8%p de C), eutetóide (0.8%p de C) e hipereutetóide (>0.8%p de C).

3.2.1 Aço Carbono e Aço de Baixa Liga

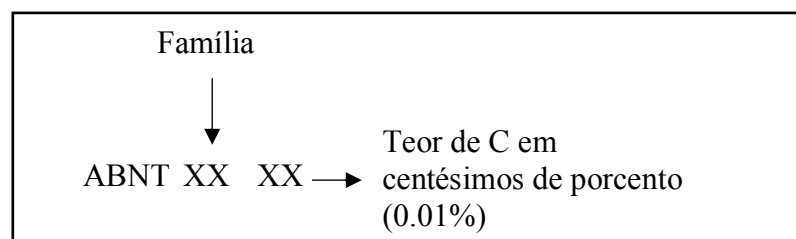
De acordo com Chiaverini (1954), os aços carbono são aqueles em que o carbono é o principal elemento de liga, apresentando certos elementos residuais decorrente do processo de fabricação nos teores considerados normais, os quais são: $\leq 1.65\%$ de Mn, $\leq 0.30\%$ de Si, $\leq 0.040\%$ de P e $\leq 0.050\%$ de S. Por esse motivo, o carbono é o elemento que dita não somente a microestrutura, mas também a resistência e a maioria das propriedades mecânicas desses tipos de aços, considerando que essas características estão intimamente relacionadas com o tamanho e distribuição das partículas de carbonetos no material.

Já os classificados como aço de baixa liga, são aqueles em que a presença dos elementos residuais está acima dos valores considerados normais, ou há outros elementos de liga cujo teor não exceda normalmente 3.5%p (CHIAVERINI, 1954). Nesses aços, a parcela desses novos elementos modifica a cinética de transformação de fases, ou seja, a velocidade com que elas ocorrem, porém não é suficiente para mudar fortemente as estruturas dos aços

resultantes, mas sim facilitar estas transformações, por exemplo, a obtenção de estruturas refinadas ou de estruturas bainíticas e martensíticas (ZEEMANN, 2016).

O sistema numérico de identificação, de modo geral, desses tipos de aços segundo a ABNT segue o seguinte raciocínio: os aços são designados por quatro algarismos, em certos casos precedidos por uma letra maiúscula que especifica o processo de fusão, sendo os dois primeiros números indicadores do tipo e do teor aproximado de elementos de liga e os dois últimos especificadores do teor de carbono no aço (Figura 2 e Figura 3).

Figura 2 – Designação dos aços segundo a norma ABNT.



Fonte: Adaptado do Copaert (2008).

Figura 3 – Classificação dos aços carbono e dos aços de baixa liga pela norma ABNT

ABNT ou AISI	TIPO DE AÇO
C10XX	Aços-ao-carbono
C11XX	Aços de usinagem fácil (com alto teor de S)
C12XX	Aços de usinagem fácil (com altos teores de P e S)
13XX	Aços ao Mn (de 1,5 a 2,0% Mn)
23XX	Aços ao Ni (de 3,25 a 3,75% Ni)
25XX	Aços ao Ni (de 4,75 a 5,25% Ni)
31XX	Aços ao Ni-Cr (1,10-1,40% Ni e 0,55-0,90% Cr)
E33XX	Aços ao Ni-Mo (3,25-3,75% Ni e 1,40-1,75%Cr)
40XX	Aços ao Mo (0,20-0,30% Mo)
41XX	Aços ao Cr-Mo (0,40-1,20% Cr e 0,08-0,25%Mo)
43XX	Aços ao Ni-Cr-Mo (1,6-2,0% Ni; 0,4-0,9% Cr; 0,2-0,3% Mo)
46XX	Aços ao Ni-Mo (1,40-2,00%Ni e 0,15-0,30% Mo)
48XX	Aços ao Ni-Mo (3,25-3,75% Ni e 0,20-0,30% Mo)
50XX	Aços ao Cr (0,27-0,50% Cr)
51XX	Aços ao Cr (0,70-1,20% Cr)
61XX	Aços ao Cr-V (0,70-1,10% Cr e 0,10%V)
86XX	Aços Ni-Cr-Mo (0,2-0,4% Ni; 0,3-0,5% Cr; 0,08-0,15% Mo)
87XX	Aços Ni-Cr-Mo (0,4-0,7% Ni; 0,4-0,6% Cr; 0,2-0,3 %Mo)
92XX	Aços ao Mn-Si (1,4-2,0 %Si e 0,60-0,90% Mn e 0-0,7% Cr)
XXBXX	Aços ao B contendo 0,0005-0,003% B (Ex.: aço 10BXX = aço-ao-carbono com B; aço 50BXX = aço ao Cr com B)

Fonte: Brunatto (2016).

Ultra Low Carbon, AISI 1010, AISI 1040 e AISI 1080 são exemplos de aços carbono comerciais que diferem em si com relação ao teor de carbono na composição dessas ligas. Já o AISI 4340 é classificado como aço de baixa liga, que se diferencia do aço carbono devido a presença do Ni, Cr e Mo em baixas concentrações. Tanto os diferentes teores de carbono quanto os elementos de liga, no caso do AISI 4340, afetam a microestrutura e, conseqüentemente, a aplicabilidade desses aços, como será discutido mais adiante no presente trabalho.

3.2.2 Aços de Alta Liga

Os aços de alta liga são aqueles cuja soma dos teores dos elementos de liga ultrapassa 12%p, podendo alterar profundamente as microestruturas dos aços correspondentes, os tratamentos térmicos comerciais, os quais passam a exigir técnicas e cuidados especiais e, frequentemente, operações múltiplas, e, conseqüentemente, as propriedades desses aços (CHIAVERINI, 2005).

Segundo Zeemann (2016), a adição proposital de uma grande quantidade de certos elementos de liga visa obter propriedades que resistam a meios bastante agressivos, como elevada resistência à oxidação, ao desgaste, ao calor ou às temperaturas criogênicas, assim como diferentes níveis de resistência mecânica.

Dentre os aços que se enquadram nessa classificação e que são de grande interesse para a engenharia estão os aços inoxidáveis, os quais podem ser definidos como uma liga ferro (Fe), carbono (C), cromo (Cr) e outros elementos, por exemplo Ni, Mo, Cu, Si, Al, Nb e N, contendo no mínimo 10.5%p de Cr, o qual é o principal elemento de liga e o que confere uma elevada resistência à oxidação e à corrosão a esses aços. Suas características de resistência se dá devido a formação de um óxido protetor que impede o contato do metal-base com a atmosfera agressiva (CARBÓ, 2008).

Uma vez que a microestrutura dos aços inoxidáveis tem efeito dominante sobre suas propriedades, esses aços são normalmente divididos em cinco famílias de acordo com sua microestrutura a temperatura ambiente. As cinco famílias são: Martensíticas, Ferríticas, Austeníticas, Dúplex, Endurecíveis por precipitação (COPAERT, 2008).

O aço ASTM 2205 é um exemplo de um aço alta liga que pertence a família dos aços inoxidáveis dúplex e a liga E2 (9Cr-7Mo) é um aço alta liga cuja microestrutura e características se assemelha a dos aços inoxidáveis ferríticos, cujas características estão descritas na Tabela 1, e que serão abordados ao longo deste trabalho.

Tabela 1 - Características dos aços ferríticos e dúplex.

Família	Características
Ferríticos	Ligas de ferro e cromo essencialmente ferríticas a todas as temperaturas, e que não endurecem por tratamento térmico de têmpera. Normalmente, têm teores de cromo mais elevados do que os aços martensíticos e têm, naturalmente, menores teores de carbono.
Dúplex	Microestruturas contendo uma combinação de austenita e ferrita em frações aproximadamente iguais que são obtidas com composições balanceadas de ferro, cromo (18-27%), níquel (4-7%), molibdênio (1-4%) e outros elementos, especialmente nitrogênio e apresentam propriedades muito interessantes para diversas aplicações

Fonte: Adaptação do Copaeart (2008).

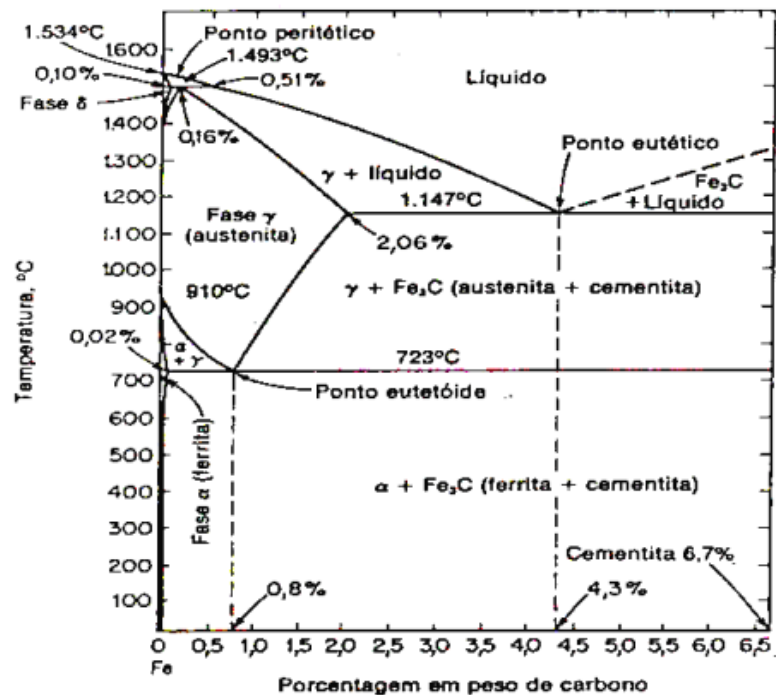
3.3 Microestrutura dos aços

Diversas microestruturas podem ser produzidas em ligas de aço, as quais são fortemente dependentes tanto do teor de carbono e composição química em geral, quanto dos diversificados tipos de tratamentos térmicos sob os quais esses aços podem ser submetidos. Por esse motivo, a análise microestrutural desses materiais se faz importante, permitindo entender as correlações “microestrutura – defeitos – propriedades” e, além disso, prever as propriedades dos materiais quando estas correlações estão estabelecidas (MALISKA, s.d.).

De acordo com Silva e Mei (2010), há diagramas para as ligas Fe-C que descrevem as faixas de temperaturas em que as fases ferrita, austenita e cementita são estáveis e as respectivas temperaturas em que ocorrem suas transformações. Esses diagramas, como é ilustrado na Figura 4 e na Figura 5, são de grande importância para a previsão e o entendimento das microestruturas dos aços.

Dentre esses diagramas (Figura 4) está o chamado diagrama de equilíbrio de fases do sistema Fe-Fe₃C, que por meio dele é possível prever quais fases se formam quando o aço é resfriado lentamente, ou seja, em circunstâncias de equilíbrio termodinâmico. No entanto, esses diagramas são limitados uma vez que consideram que as transformações de fases são independentes do tempo, isto é, que fenômenos de difusão não estão envolvidos (CALLISTER, 2006).

Figura 4 – Diagrama de equilíbrio para o sistema ferro-carboneto de ferro.

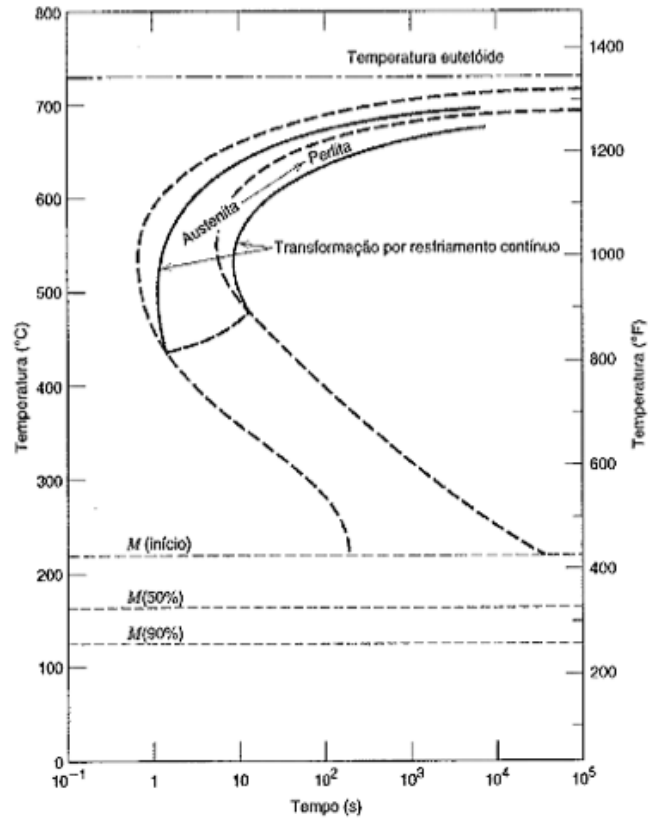


Fonte: www.durferrit.com.br

Devido a essa limitação, foram desenvolvidos outros diagramas que levassem em consideração a dependência das transformações de fases tanto da temperatura quanto do tempo na formação dos constituintes estruturais dos aços, ou seja, em situações fora do equilíbrio termodinâmico. Esses diagramas são os TTT e os TRC que são conhecidos, respectivamente, por diagramas de transformações isotérmicas e diagramas de transformação por resfriamento contínuo (Figura 5), cujo os formatos das curvas características, assim como a temperatura de início e fim das transformações são bastante dependentes da composição química de cada liga (CALLISTER, 2006).

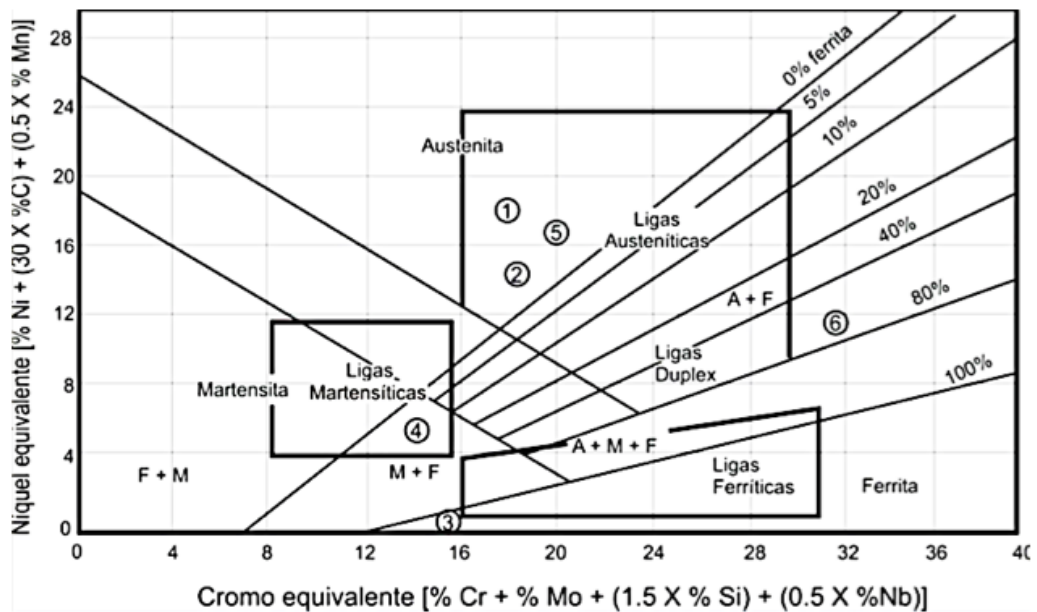
Outro diagrama de grande importância é o diagrama de Schaeffler (Figura 6), o qual é bastante utilizado para prever a microestrutura dos aços inoxidáveis, representando de forma simplificada as relações das fases em função da composição química da liga, a qual considera os elementos estabilizadores da estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) e da estrutura cúbica de face centrada (CFC) na fórmula do “cromo equivalente ($Cr_{\text{equivalente}}$) e do “níquel equivalente ($Ni_{\text{equivalente}}$), respectivamente (COPAERT, 2008).

Figura 5 – Superposição dos diagramas de transformação isotérmica e de transformação por resfriamento contínuo para uma liga ferro-carbono com composição eutetóide.



Fonte: Callister (2006).

Figura 6 – Diagrama de Schaeffler para os aços inoxidáveis.

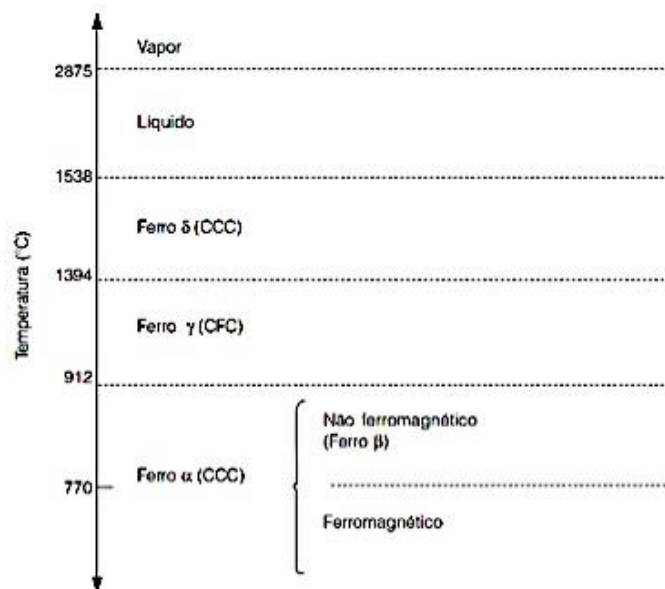


Fonte: Davis (1994).

3.3.1 Constituintes estruturais dos aços

O ferro na fase sólida apresenta polimorfismo, isto é, apresenta duas estruturas cristalinas à pressão ambiente, como ilustra a Figura 7, dependendo da temperatura. A baixas temperaturas até 912 °C, o ferro apresenta a estrutura CCC, conhecida como ferrita alfa; acima desta temperatura, a estrutura CFC ou austenita, se torna mais estável até 1394 °C, e entre esta temperatura até o ponto de fusão do ferro (1538 °C) a estrutura CCC, conhecida como ferrita delta, volta a ser estável (Figura 7) (COPAERT, 2008).

Figura 7 – Transformação alotrópica do ferro.



Fonte: Adaptado do Chiaverini (2008).

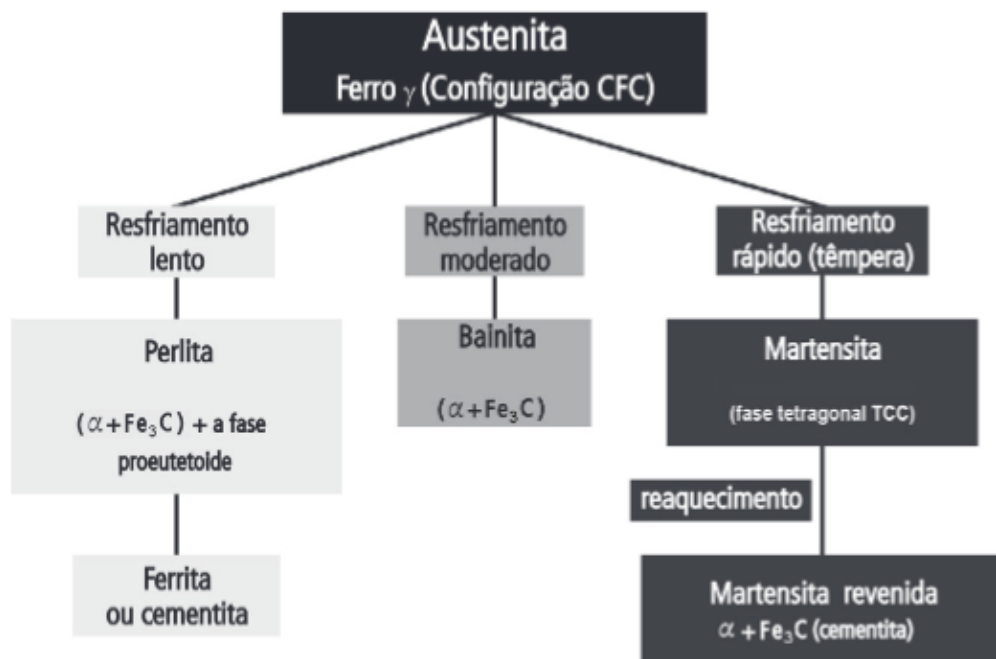
Quando o ferro é combinado com o carbono, o qual atua como uma impureza intersticial, formando o aço, há a formação dos seguintes constituintes: austenita, ferrita, cementita, perlita, bainita e martensita.

3.3.1.1 Austenita

Solução sólida em ferro gama (CFC), sendo a solubilidade máxima de carbono de 2.11% na temperatura de 1147°C. Essa fase, quando ligada somente ao carbono, não é estável a uma temperatura inferior a 727°C, como indica no diagrama de equilíbrio ferro-carboneto de ferro (Figura 4), sendo esse o motivo pelo qual as transformações de fases envolvendo a

austenita são de grande relevância nos tratamentos térmicos dos aços (Figura 8). Porém, quando há a presença de certos elementos que estabilizam a austenita, por exemplo o níquel, essa fase torna-se estável e presente na microestrutura do aço à temperatura ambiente, como é no caso dos aços inoxidáveis austeníticos. Essa fase apresenta elevada ductilidade e tenacidade, porém baixa resistência mecânica (CALLISTER, 2006).

Figura 8 – Transformações possíveis envolvendo a decomposição da austenita.



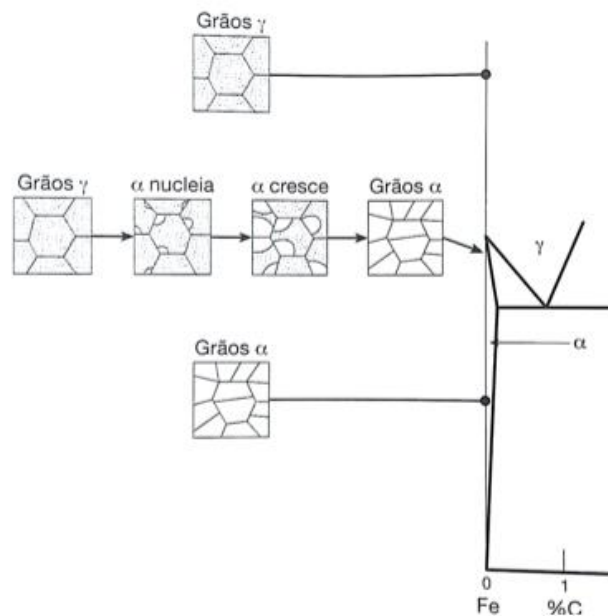
Fonte: Callister (2006).

3.3.1.2 Ferrita

Solução sólida de carbono em ferro alfa (CCC), o qual apresenta solubilidade máxima de carbono de 0.022%p na temperatura de 727°C. Essa fase forma-se por difusão a partir do resfriamento da austenita, nucleando preferencialmente nos contornos de grão austenítico, porém, com o aumento da taxa de resfriamento, a ferrita passa a nuclear no interior desse grão (SILVA e MEI, 2010).

A ferrita é a fase estável dos aços que apresenta menor dureza e é a mais tenaz e maleável, podendo estar presente na microestrutura como constituinte ou vinculada com a cementita (Fe_3C) para formar outro constituinte conhecido como perlita.

Figura 9 – Representação esquemática da transformação da austenita em ferrita em condições próximas ao equilíbrio.



Fonte: Adaptado de Ashby e Jones (2006).

3.3.1.3 Cementita

Denominação do carboneto de ferro (Fe_3C) contendo 6.7% de C e estrutura cristalina ortorrômbica. Segundo Copaert (2008), esse constituinte aparece nos aços quando a solubilidade do carbono na ferrita é excedida, nucleando nas heterogeneidades estruturais e crescendo pela difusão de carbono até estes núcleos.

Esse constituinte é bastante frágil e duro, apresentando baixa ductilidade e baixa tenacidade.

3.3.1.4 Perlita

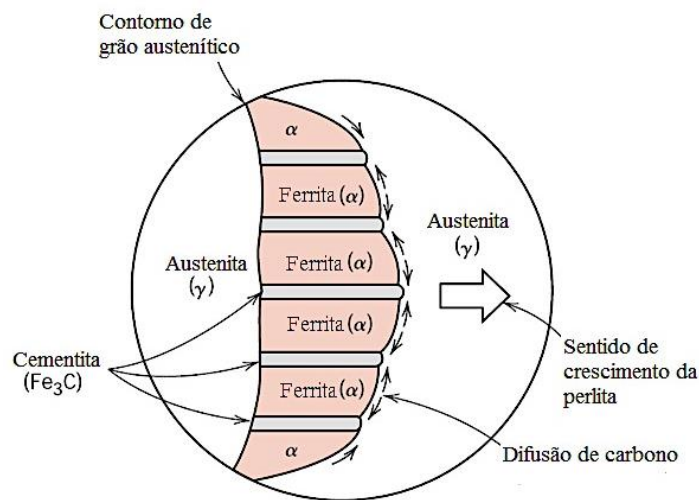
De acordo com Chiaverini (2005), a perlita é um microconstituente dos aços que consiste de uma mistura de 88.5% de ferrita e 11.5% de cementita, na forma de lâminas finas dispostas alternadamente, como ilustra a Figura 10, e cuja morfologia está relacionada com a temperatura da transformação. Resfriamentos próximos à temperatura de austenitização levam a formação de grãos de perlita maiores e com lamelas de maior espessura, ocasionada por uma menor taxa de nucleação e a uma alta taxa de difusão à essa temperatura. Já as transformações à temperatura menor geram grãos e espessura das lamelas menores. A proporção desse

constituente nos aços pode variar desde aproximadamente 0% em aços com baixíssimo teor de carbono até 100% nos aços eutetóides (0.8%pC).

Segundo Silva e Mei (2010), esse microconstituente nucleia preferencialmente nos contornos de grão da austenita homogênea a partir da formação da ferrita ou da cementita, dependendo do teor de carbono do aço.

Por ser uma mistura da ferrita e da cementita, a perlita apresenta, portanto, propriedades mecânicas intermediárias entre as duas fases, dependendo, entretanto, das dimensões das partículas de cementita (CHIAVERINI, 2005).

Figura 10 – Diagrama esquemático da formação de uma colônia de perlita nucleada a partir de um contorno de grão da austenita.



Fonte: Callister (2006).

3.3.1.5 Bainita

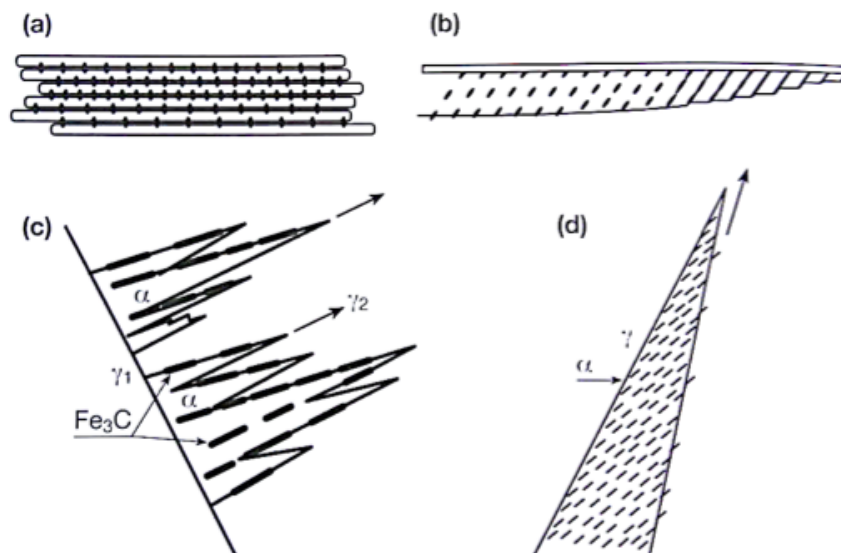
Semelhante a perlita, a bainita é constituída de uma mistura de ferrita e carboneto de ferro (cementita), porém apresenta morfologia distinta da perlita. Essa fase é subclassificada de bainita superior e bainita inferior de acordo com a temperatura de transformação, apresentando como principal diferença entre elas a forma de precipitação dos carbonetos (COPAERT, 2008). A bainita superior, que é formada em temperaturas próximas ao cotovelo das curvas em “C”, é composta por ferrita na forma de ripas ou agulhas e partículas alongadas de cementita formada entre as ripas, a partir do carbono rejeitado na formação da ferrita (Figura 11 (a)). Já a bainita inferior, a qual é formada em temperaturas próximas à temperatura de início da formação das martensita, é constituída por ferrita na forma de plaquetas e por partículas

muito finas de carbonetos precipitadas no interior dessas plaquetas (Figura 11 (b)) (SANTOS, 2006).

Devido a semelhança desse constituinte com a perlita, nos aços carbono a distinção dessas microestruturas apresenta certa dificuldade, enquanto que nos aços ligados são estruturas bem diferentes (SILVA e MEI, 2010).

Por apresentar uma estrutura mais refinada, isto é, menores partículas de ferrita e de cementita, a bainita é, em geral, mais resistente e dura que a perlita, contudo, ainda assim esse constituinte apresenta uma desejável combinação de resistência e ductilidade (CALLISTER, 2006).

Figura 11 - Esquema das morfologias mais comuns.



Fonte: Copaert (2008). (a) Bainita superior (b) Bainita inferior. As partículas pretas representam cementita. As regiões brancas, ferrita. Esquemas simplificados do crescimento (c) da bainita superior, com precipitação de carboneto entre as placas de ferrita e (d) da bainita inferior em que os carbonetos seriam precipitados dentro da ferrita após a transformação.

3.3.1.6 Martensita

Solução sólida supersaturada de carbono em ferro tetragonal de corpo centrado (TCC). É uma fase, ou microconstituinte, metaestável que se forma quando o aço, com estrutura austenítica, é resfriado bruscamente, de modo que não haja tempo suficiente para difusão dos átomos de carbono dissolvidos na estrutura cúbica de faces centradas da austenita, ocorrendo, desse modo, a transformação pelo cisalhamento da estrutura (SANTOS, 2006; SILVA e MEI, 2010).

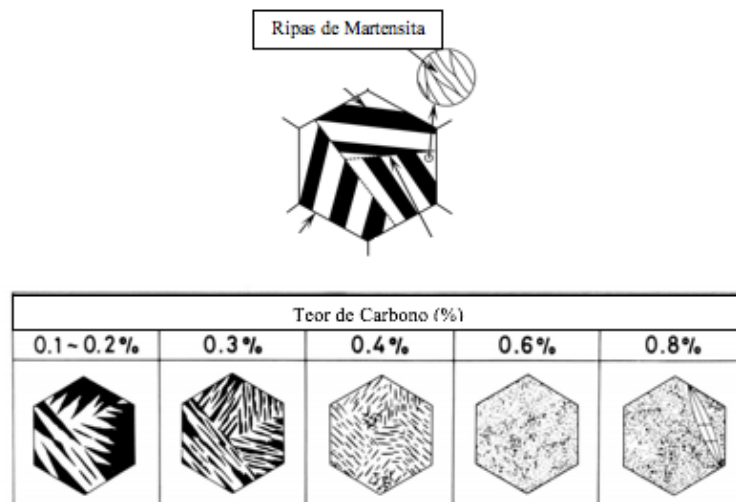
Visto que a transformação martensítica não envolve difusão, ela ocorre quase instantaneamente e seus grãos nucleiam e crescem a uma taxa elevadíssima, equivalente à velocidade do som no interior da matriz de austenita.

Por ser uma fase fora de equilíbrio, a martensita não aparece no diagrama de fases ferro-carboneto de ferro (Figura 4), porém encontra-se nos diagramas TTT e TRC, cujas temperaturas de início (M_s) e término (M_f) dessa transformação variam de acordo com a composição da liga. A variação dessas temperaturas está relacionada com a temperabilidade do aço, que pode ser definido como a facilidade com que uma determinada liga forma a martensita (CALLISTER, 2006)

De acordo com Copaert (2008), a morfologia da martensita formada é afetada principalmente pelo teor de carbono, apresentando-se na forma de ripas em aços com baixo teor de carbono ($<0.6\%p$) (Figura 12) e na forma de placas em aços com alto teor de carbono (Figura 13).

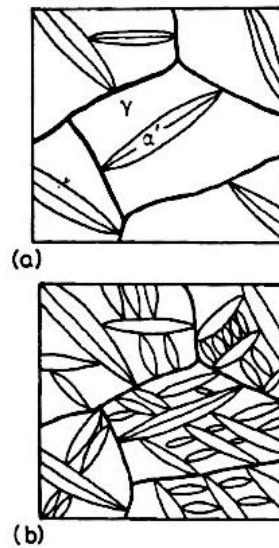
Das demais microestruturas que podem ser produzidas para uma dada liga de aço, a martensita é a mais dura e a mais resistente e, além disso, a mais frágil, apresentando, então, uma ductilidade desprezível. Sua dureza é dependente do teor de carbono até aproximadamente $0.6\%p$, e diferentemente dos aços perlíticos, acredita-se que a resistência e dureza da martensita não estejam relacionadas à microestrutura, mas sim com a eficiência dos átomos de carbono intersticiais em restringir o movimento das discordâncias, assim como ao número relativamente pequeno de sistema de escorregamento (CALLISTER, 2006).

Figura 12 – Efeito do teor de carbono na espessura das ripas de martensita.



Fonte: Adaptado de Maki; Tsuzaki; Tamura (1980).

Figura 13 – Crescimento de placas de martensita com incremento do resfriamento abaixo de M_s a) crescimento da placa de martensita interrompido pelo contorno de grão da austenita b) propagação da martensita



Fonte: Porter e Easterling (1992).

3.3.2 Influência dos elementos de liga na microestrutura dos aços

Além do carbono, outros elementos estão presentes nos aços, sejam esses elementos inerentes ao processo de fabricação, que é o caso dos baixos teores de fósforo, enxofre, silício e manganês, ou sejam eles adicionados propositalmente para alterar a estrutura, propriedades e modos de processamento dos aços.

Semelhante ao carbono, certos elementos formam solução sólida com o ferro α , melhorando, dessa forma, a resistência à tração, ductilidade e tenacidade da liga. Já outros elementos, como molibdênio, cromo, vanádio, boro, titânio e tungstênio, podem se unir ao carbono presente nos aços e formar compostos intermetálicos que apresentam elevada dureza e baixa tenacidade. Tendo em vista esses efeitos, pode-se dizer que os elementos de liga alteram as características das fases e os constituintes presentes nos aços (SILVA E MEI, 2010). Contudo, esses não são as únicas consequências causadas pelos elementos de liga nos aços.

Dentre os diversos impactos estão as modificações das faixas de temperaturas de estabilidade e de transformações das fases, assim como as suas velocidades, afetando, dessa forma, os diagramas de equilíbrio para o sistema ferro-elemento de liga (Figura 14) e posição das curvas dos diagramas TTT e TRC (Figura 15, Figura 16 e Figura 17), o que, conseqüentemente, influi nas fases estáveis à temperatura ambiente

Como visto anteriormente, o ferro possui duas formas alotrópicas – alfa e gama – cuja temperatura de transformação de uma fase para outra se dá a uma única temperatura (912°C), como visto na Figura 7. A presença de qualquer elemento adicional cria uma faixa de temperatura mais ou menos estreita, na qual ambas as formas alotrópicas podem coexistir em equilíbrio. As modificações dessas faixas de temperatura em que ocorre as transformações microestruturais do aço se dá devido as diferentes solubilidades dos vários elementos de liga nessas formas alotrópicas do ferro (CHIAVERINI, 2005; SILVA E MEI, 2010)..

Tendo em vista essas alterações, os elementos de liga podem ser divididos em dois grupos, de acordo com o diagrama de equilíbrio binário com o ferro: tipo A – estabilizadores da austenita; tipo B – estabilizadores da ferrita. Por exemplo, o elemento estabilizador da austenita tenderá a aumentar a faixa de temperatura na qual essa fase é estável.

Dentre desses grupos A e B, considera-se as seguintes classificações dos elementos de liga: A₁, A₂, B₁ e B₂. A Tabela 2 caracteriza cada classificação com relação a função que exerce sobre o campo austenítico e/ou campo ferrítico, indicando os elementos pertencentes a cada grupo.

Com relação as mudanças das curvas dos diagramas TTT e TRC, todos os elementos de liga, com exceção do cobalto, deslocam as curvas de início e de fim das transformações para direita, isto é, atrasando as transformações de fase e, por consequência, facilitando a obtenção de uma estrutura martensítica. Além do deslocamento das curvas, os elementos de liga nos aços ligados alteram a forma da curva, o que facilita a obtenção de microconstituintes como a bainita.

Tabela 2 – Classificação dos elementos estabilizadores da austenita e estabilizadores da ferrita.

Tipo	Característica	Elementos
A₁	Ao diminuir a temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \alpha$ e aumentar a temperatura de transformação $\gamma \rightarrow \delta$, esses elementos aumentam a faixa de temperatura para a austenita estável.	Níquel, Manganês e Cobalto
A₂	O campo austenítico é expandido até a formação de um composto de ferro.	Carbono e Nitrogênio
B₁	Elementos que restringem a formação da austenita, favorecendo, assim, a expansão do campo ferrítico.	Silício, Cromo, Molibdênio, Fósforo, Vanádio, Titânio e Alumínio

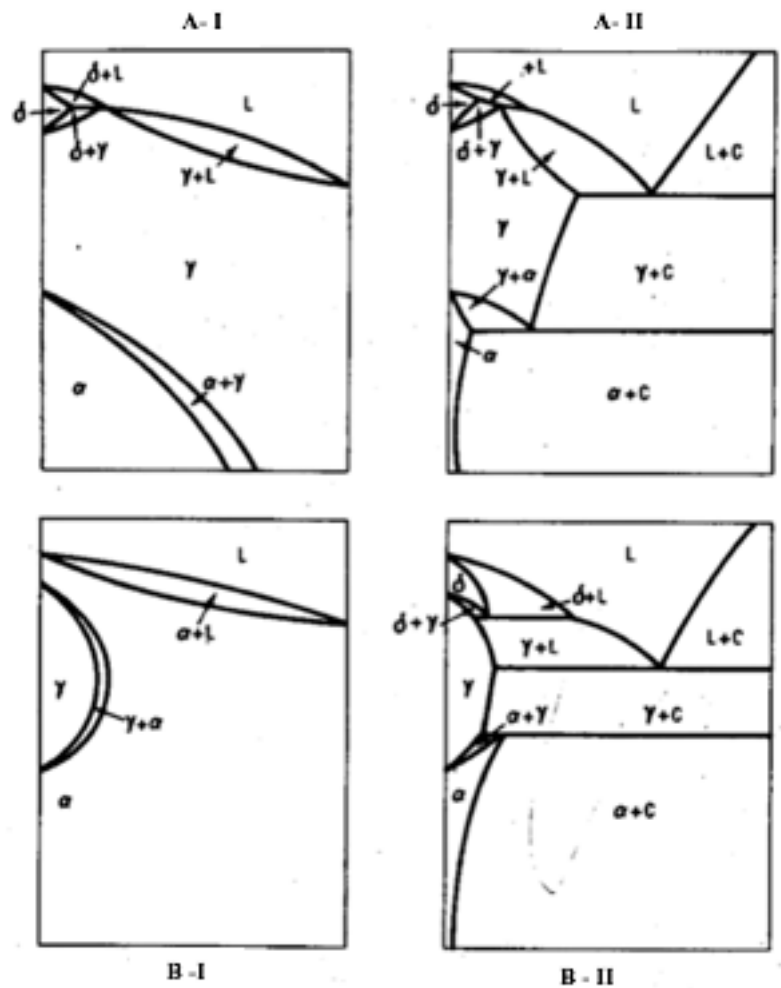
B₂

O campo austenítico é interrompido pela formação de Boro, Enxofre, Tântalo, Zircônio e Nióbio.

Fonte: Silva e Mei (2010).

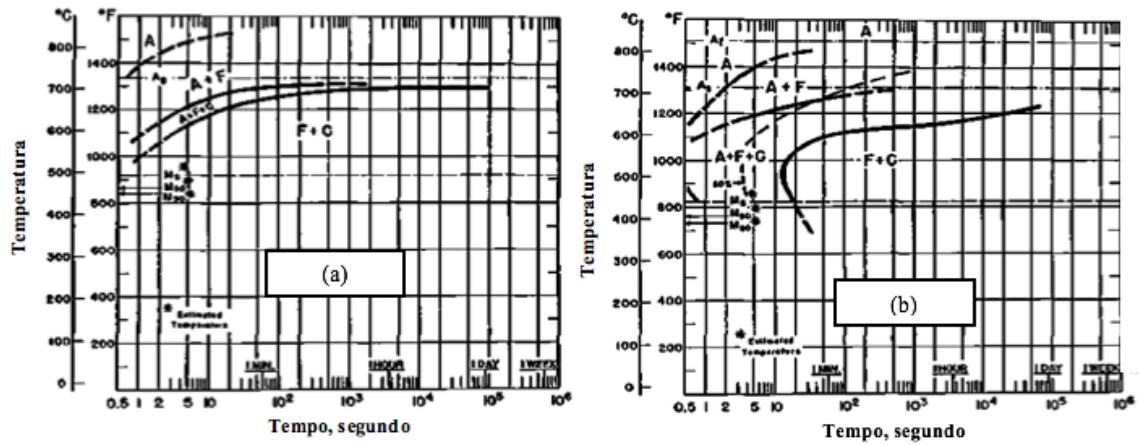
A Figura 15 e a Figura 16 mostram, respectivamente, o deslocamento da curva para direita ao aumentar o teor de carbono e ao aumentar o teor de um elemento de liga no aço carbono, cuja a forma em ambas se manteve em formato de “C”. Por último, a Figura 17 ilustra tanto o deslocamento da curva como uma acentuada mudança de sua forma, causada pela presença dos elementos de liga dos aços ligados.

Figura 14 – Tipos de diagrama de equilíbrio para o sistema ferro-elemento de liga.



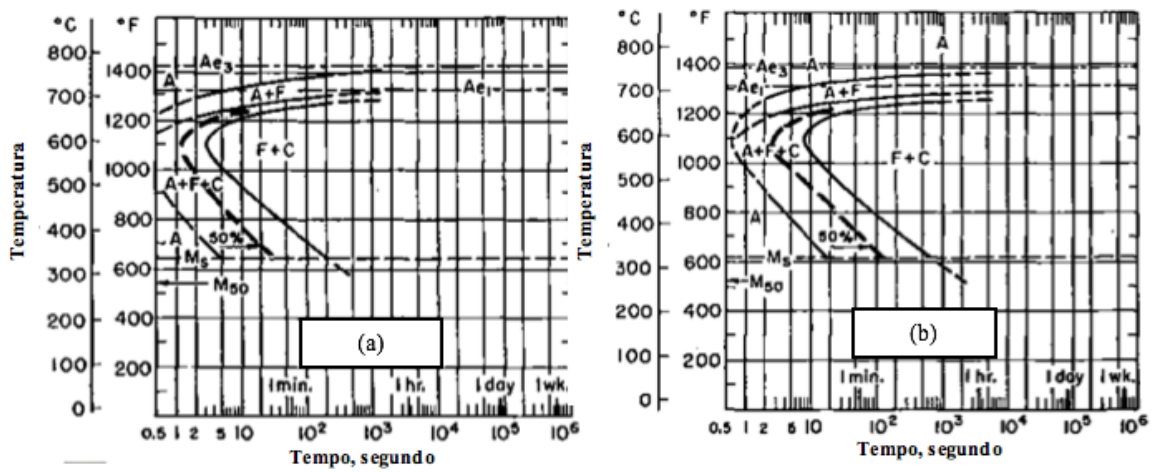
Fonte: Chiaverini (2008).

Figura 15 – Curvas TTT dos aços (a)AISI 1006 e (b)AISI 1020.



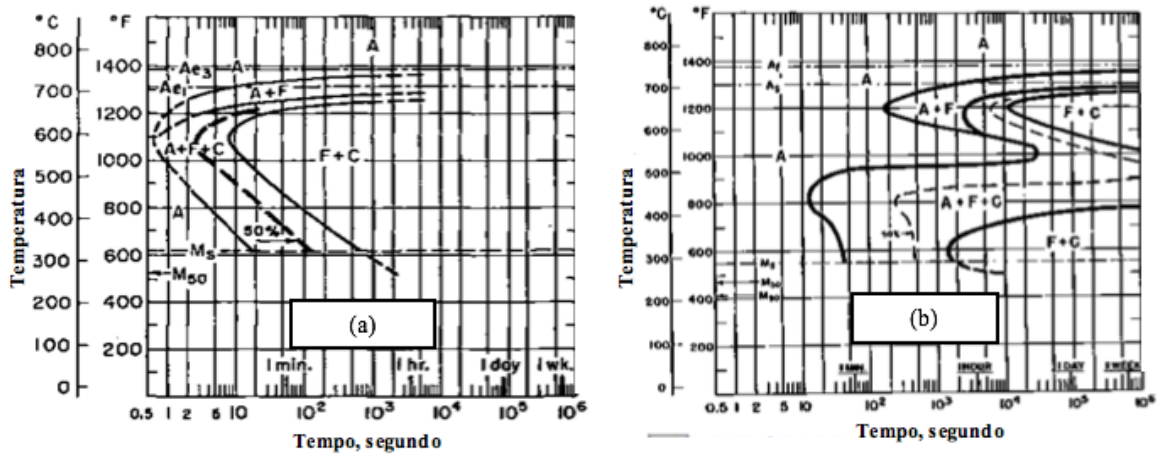
Fonte: Voort (1991).

Figura 16 – Curvas TTT dos aços (a)AISI 1045 e (b)AISI 1045+Cu



Fonte: Voort, (1991).

Figura 17 – Curvas TTT dos aços (a)AISI 1045 e (b)AISI 4340



Fonte: Voort, (1991).

3.4 Tratamentos térmicos

Tratamento térmico pode ser definido como o aquecimento ou resfriamento controlado dos metais feito com a finalidade de alterar suas propriedades físicas e mecânicas, sem alterar a forma do produto final (CHIAVERINI, 2008). A Figura 18 nomeia os diferentes tipos de tratamento térmico que os aços podem ser submetidos.

O presente trabalho irá citar o tratamento de normalização, o qual é, segundo o autor Chiaverini (2008), caracterizado por um aquecimento à temperatura acima da zona crítica, como ilustra a Figura 19, equalizando a peça nessa temperatura, e seguido por um resfriamento uniforme ao ar, sem restringi-lo ou acelerá-lo, até a temperatura ambiente. A Figura 20 apresenta um esquemático das etapas da normalização.

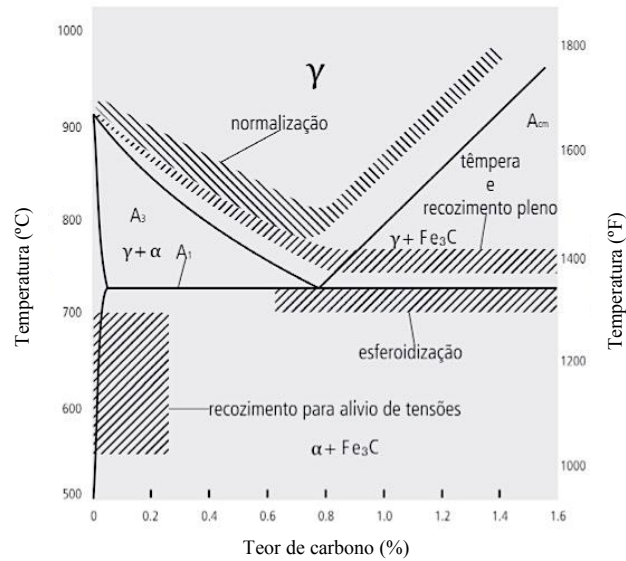
Figura 18 – Tipos de tratamentos térmicos dos aços.



Fonte: Adaptação do Callister (2006).

Esse tratamento visa refinar a granulação grosseira de peças de aços fundidos e de peças que sofreram laminação ou forjamento. Além disso, a normalização é indicada para ser um tratamento preliminar à têmpera e ao revenido, com o intuito de produzir uma estrutura mais uniforme do que a obtida por laminação, por exemplo, além de reduzir a tendência ao empenamento e facilitar a solução de carbonetos e elementos de liga (CHIAVERINI, 2008).

Figura 19 – Faixas de temperatura recomendadas para o tratamento térmico de aços ao carbono, superpostas ao diagrama de equilíbrio de fases metaestável Fe-C.

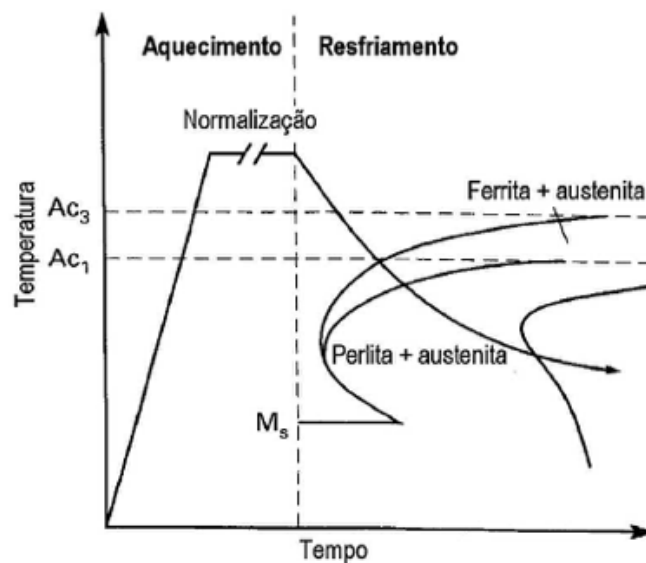


Fonte: Adaptado do Callister (2006).

Os constituintes que são obtidos por esse tratamento são ferrita e perlita fina para aços hipoeutetóides, ou cementita e perlita fina para aços hipereutetóides. Eventualmente, dependendo do tipo de aço, pode-se obter bainita, como pode ser visto na

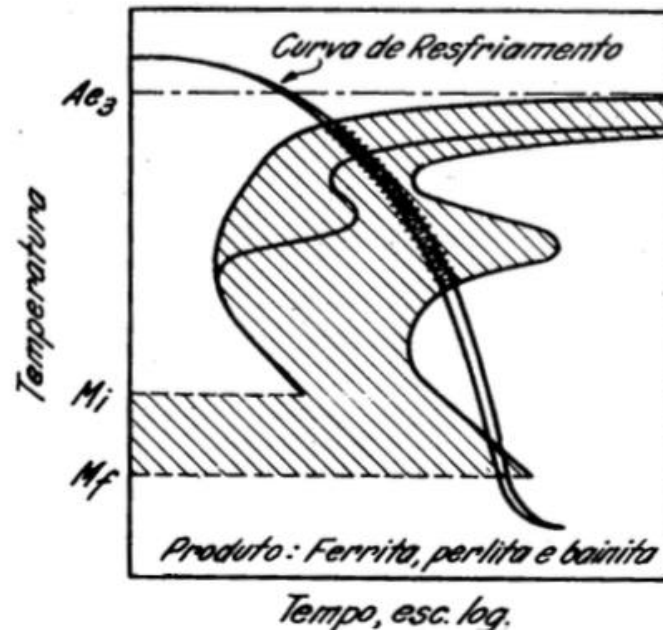
Figura 21, assim como pode-se obter martensita em aços ligados (SILVA e MEI, 2010).

Figura 20 – Diagrama esquemático de transformação para normalização.



Fonte: www.maxirate.com.br

Figura 21 – Diagrama esquemático de transformação para normalização, comprovando a possibilidade de obtenção do constituinte bainita.



Fonte: Chiaverini (2008)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos tópicos seguintes estão escritos os materiais, equipamentos e ensaios realizados para obter os objetivos propostos nessa pesquisa.

4.1 Materiais

Os materiais utilizados nas etapas desse trabalho foram os aços carbonos *Ultra Low Carbon*, AISI 1010, AISI 1040 e AISI 1080; o aço baixa liga AISI 4340 e os aços alta liga E2(9Cr-7Mo) e ASTM 2205, cedidos pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) e pelo Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS).

A composição química dos aços *Ultra Low Carbon*, AISI 1010, AISI 1040, AISI 1080, ASTM 2205 e E2(9Cr-7Mo) foi obtida conforme a Tabela 3 pela técnica de queima, fazendo uso do Espectrômetro de Emissão Óptica SHIMADZU PDA 7000, após a preparação da superfície das amostras com lixamento até 250 *mesh*. Porém, para o AISI 4340 assumiu-se a composição nominal de especificação (Tabela 4) devido a uma limitação dimensional da amostra, não permitindo fazer uso da mesma técnica das demais.

Tabela 3– Composição química das amostras via Espectrômetro de Emissão Ótica.

Amostra	Composição (% em peso)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
Ultra Low Carbon	0.012	0.007	0.092	0.012	0.008	0.009	0.012
	Mo	Cu	Ti	V	Al	Nb	Fe
	0.005	0.010	0.061	0.005	0.040	-	Bal.
AISI 1010	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
	0.125	0.196	0.573	0.022	0.028	0.044	0.064
	Mo	Cu	Ti	V	Al	Nb	Fe
	0.023	0.114	0.001	0.003	0.005	-	Bal.
AISI 1040	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
	0.429	0.249	0.636	0.022	0.005	0.011	0.015
	Mo	Cu	Ti	V	Al	Nb	Fe
	0.018	0.004	0.001	0.001	0.021	-	Bal.
AISI 1080	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
	0.840	0.547	1.091	0.015	0.016	0.021	0.209
	Mo	Cu	Ti	V	Al	Nb	Fe
	0.036	0.009	0.003	0.008	0.002	0.002	Bal.
ASTM 2205	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
	0.046	0.422	1.313	0.037	0.002	5.789	23.046
	Mo	Cu	Ti	V	Al	Nb	Fe
	3.201	0.083	0.005	0.065	0.122	0.042	Bal.
E2(9Cr-7Mo)	C	Mn	Si	Cr	Mo		
	0.030	0.380	0.370	9.50	7.30		

Fonte: Própria do Autor.

Tabela 4 – Composição química nominal do AISI 4340.

Amostra	Composição (% em peso)				
	C	Si	Mn	P	S
AISI 4340	0.37 – 0.43	0.15 – 0.30	0.60 – 0.80	≤ 0.035	≤ 0.04
	Ni	Cr	Mo	Fe	
	1.65 – 2.00	0.70 – 0.90	0.20 – 0.30	Bal.	

Fonte: www.materiais.gelsonluz.com

Foram utilizadas um total de 7 amostras, cujo tamanho médio foi de 15x15x10mm, foram utilizadas, sendo as 5 amostras de aços carbono (*Ultra Low Carbon*, AISI 1010, AISI 1040 e AISI 1080) e aço baixa liga (AISI 4340) analisadas após tratamento térmico de normalização e as 2 de aços alta liga (E2(9Cr-7Mo) e ASTM 2205) como recebida.

4.2 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmico de normalização realizado nos aços carbonos e de baixa liga foram executados conforme detalha a Tabela 5. Foram usados fornos mufla EDG 3P-S e EDGCON 1P, cedidos pelo Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Esse tratamento foi realizado para eliminar a influência do processo de fabricação, de tratamentos térmicos e mecânicos anteriores sobre a microestrutura desses aços.

Tabela 5 – Tratamento térmico de normalização nas amostras de aço carbono e de baixa liga.

Amostra	Temperatura	Tempo	Resfriamento
Ultra Low Carbon	920°C		
AISI 1010			
AISI 1040	870°C	30 Minutos	Ao ar
AISI 4340			
AISI 1080	830°C		

Fonte: Própria do autor.

4.3 Metalografia

As amostras passaram por uma preparação metalográfica iniciada com o embutimento com resina de cura a quente, baquelite, seguida de lixamento em lixadeira rotativa em diferentes granulações e de forma sequencial: 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 *mesh*, e polimento com pasta de diamante com granulometria até 1µm, ambos processos realizados mecanicamente. Por fim, fez-se o ataque químico ou eletroquímico das amostras com diferentes reagentes, conforme indica a Tabela 6, para revelar a microestrutura desses materiais.

Tabela 6 – Reagentes utilizados para revelar a microestrutura das amostras.

Amostra	Reagente
Ultra Low Carbon	Nital 2% (Ataque Químico)
AISI 1010	
AISI 1040	
AISI 4340	
AISI 1080	
E2(9Cr-7Mo)	Ácido Nítrico 40%, 1V (Ataque Eletroquímico)
ASTM 2205	

Fonte: Própria do autor.

4.4 Microscopia Ótica

Posterior a preparação metalográfica, todas as amostras foram analisadas micrograficamente com o auxílio de um microscópio ótico Zeiss e software Axiovision visando a obtenção das imagens das microestruturas dos aços em estudo.

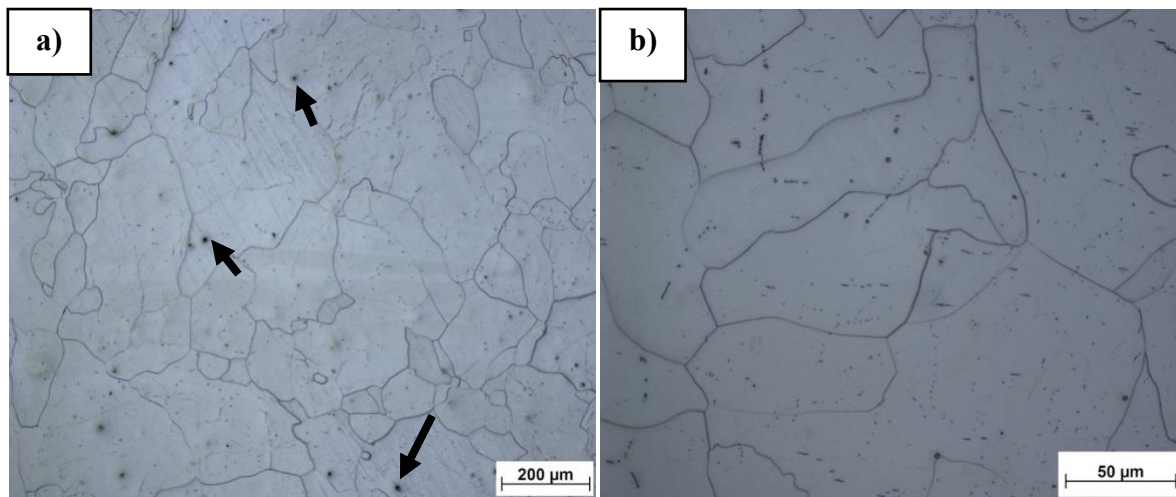
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse tópico serão apresentadas as micrografias dos aços em estudo, analisando a influência dos principais elementos de liga na microestrutura desses materiais.

5.1 Influência do carbono na microestrutura do *Ultra Low Carbon*, AISI 1010, AISI 1040 e AISI 1080

A Figura 22 apresenta a micrografia do aço *Ultra Low Carbon* após ataque químico com Nital 2%, revelando os contornos de grão da ferrita, sendo, portanto, possível a visualização de uma microestrutura praticamente 100% ferrítica devido ao baixíssimo teor de carbono na composição dessa liga, o qual é mantido em solução sólida nessa configuração estrutural do ferro, além de evidenciar também possíveis inclusões não-metálicas (pontos escuros assinalados na Figura 22).

Figura 22 – Micrografia ótica no estado normalizado do *Ultra Low Carbon* (a)100x e (b)500x. Ataque químico: Nital 2%.



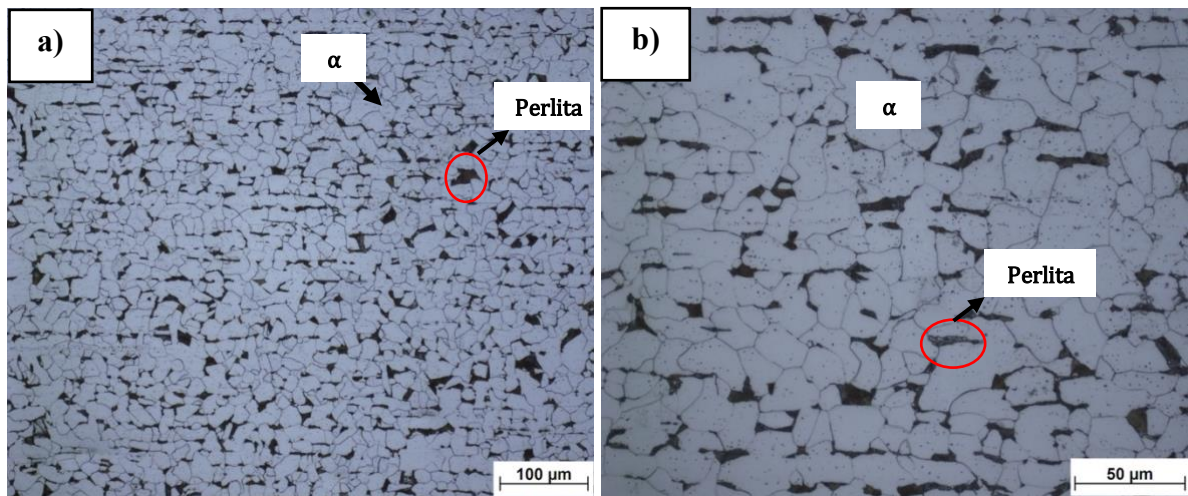
Fonte: Própria do autor.

A Figura 23 é a imagem obtida por microscopia ótica do AISI 1010 após o ataque químico com Nital 2%, o qual revela os contornos de grão da ferrita (branco) e também o microconstituente perlita (escuro), o qual pode ser visto disperso ao longo da microestrutura desse aço, porém localizados somente nos contornos de grão da ferrita. A nucleação e crescimento desse microconstituente se deu devido a um teor de carbono um pouco acima da

solubilidade máxima deste elemento na ferrita α e, por isso, é pequena a quantidade de perlita nessa microestrutura.

Para conferir que a proporção da ferrita na estrutura em comparação a da perlita é majoritária, fez-se uso da Regra da Alavanca a fim de determinar que a microestrutura desse aço é constituída de aproximadamente 87.5% de ferrita pró-eutetóide e 12.5% de perlita.

Figura 23 – Micrografia ótica no estado normalizado do AISI 1010 (a)200x e (b) 500x. Ataque químico: Nital 2%.

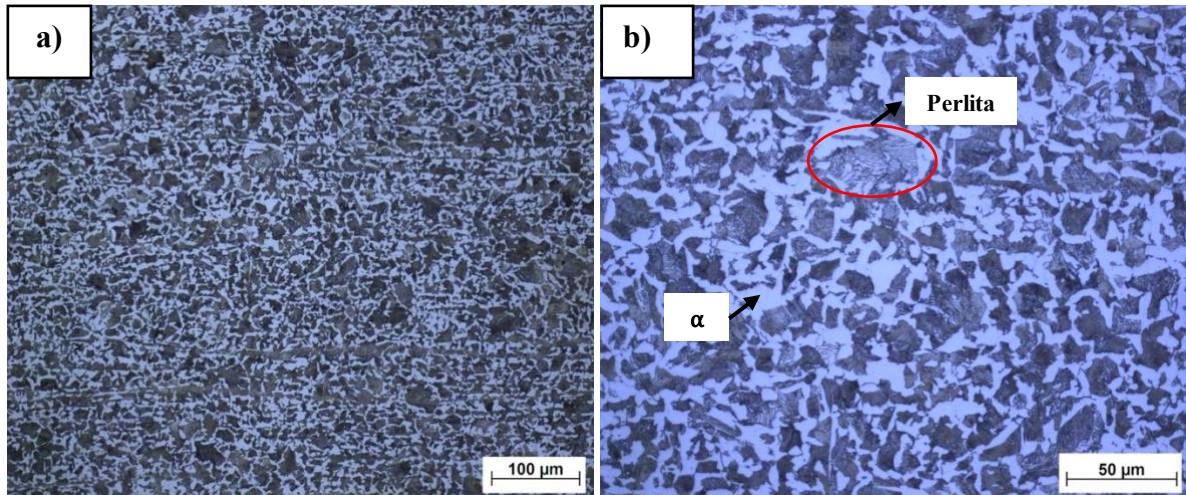


Fonte: Própria do autor.

Na micrografia do aço AISI 1040 (Figura 24), pode-se perceber uma maior quantidade de perlita em relação ao AISI 1010, visto que o teor de carbono excedente à solubilidade é maior.

A composição de fases desse aço é de aproximadamente 53.7% de perlita e 46.3% de ferrita pró-eutetóide, sendo possível identificar que esses constituintes estão misturados e igualmente dispersos ao longo da toda a microestrutura do material, diferentemente do aço AISI 1010 em que a perlita se concentra nos contornos de grão.

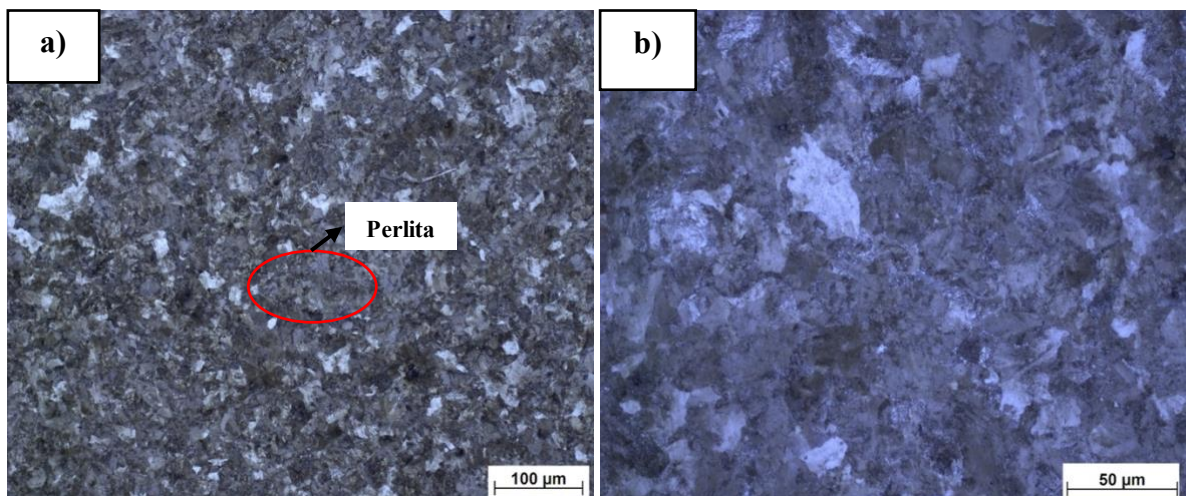
Figura 24 – Micrografia ótica no estado normalizado do AISI 1040 (a)200x e (b) 500x. Ataque químico: Nital 2%.



Fonte: Própria do autor.

Na micrografia do aço AISI 1080, também chamado de aço eutetóide, no estado normalizado (Figura 25), pode-se visualizar uma microestrutura praticamente 100% perlítica devido ao alto teor de carbono nessa liga e ao resfriamento relativamente lento a partir do campo de austenitização, permitindo, desse modo, a difusão do carbono para formação desse microconstituente. Vale salientar que a composição química dessa liga não forma as fases primárias, isto é, ferrita pró-eutetóide e cementita pró-eutetóide nos contornos de grão da austenita, por isso a ausência dessas fases na microestrutura dessa liga.

Figura 25 – Micrografia ótica no estado normalizado do AISI 1080 (a)200x e (b)500x. Ataque químico: Nital 2%.



Fonte: Própria do autor.

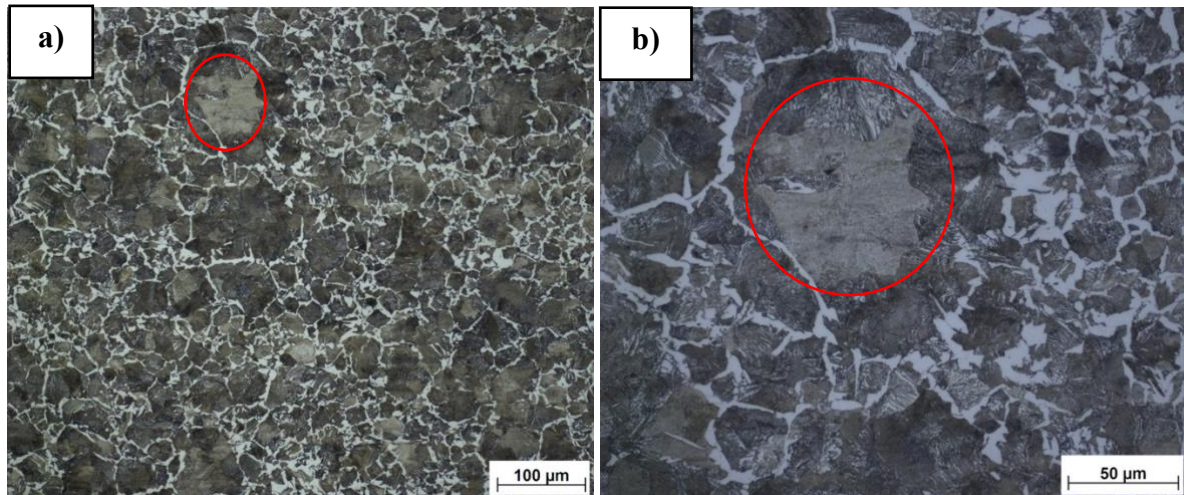
Ao analisar a Figura 22, Figura 23, Figura 24 e a Figura 25, pode-se perceber que, à medida que se eleva o teor de carbono nos aços carbonos, há uma variação nas proporções das fases e dos microconstituintes presentes, assim como nas disposições desses elementos ao longo da microestrutura à temperatura ambiente desses materiais.

É possível perceber que a fase ferrita prevalece nos aços com baixo teor de carbono, sendo de praticamente 100% no *Ultra Low Carbon* (Figura 22) e 0% no AISI 1080 (Figura 25), e, à medida que se eleva o teor de carbono até o ponto eutetóide, há um aumento na quantidade de perlita na microestrutura.

5.2 Influência da presença de Ni, Cr e Mo em baixo teores na microestrutura do aço baixa liga AISI 4340

Ao analisar as respectivas composições química do AISI 1040 (Tabela 1) e do AISI 4340 (Tabela 4), nota-se que ambos apresentam praticamente o mesmo teor de carbono, porém o AISI 4340 possui uma maior quantidade de Ni, Cr e Mo que o AISI 1040. Embora estes elementos estejam presentes na composição do AISI 4340, a micrografia de ambos se assemelham como pode ser visto na Figura 24 e na Figura 26, porém é possível identificar diferenças ao comparar a microestrutura de ambos, como um constituinte presente no AISI 4340 com morfologia diferente (indicado na Figura 26) à qualquer outro presente na micrografia do AISI 1040, o qual não pôde ser, portanto, identificado com o aumento máximo de 500x do equipamento utilizado para fazer as análises micrográficas. Suspeita-se, porém, que esse microconstituinte seja bainita, uma vez que a presença desses elementos de liga, mesmo que em baixos teores, altera o perfil da curva do diagrama TRC em relação ao do aço carbono, como pode ser visto na Figura 17, e facilita a obtenção desse microconstituinte após o resfriamento pelo qual foi submetido no tratamento de normalização.

Figura 26 – Micrografia ótica no estado normalizado do AISI 4340 (a)200x e (b)500x. Ataque químico: Nital 2%.

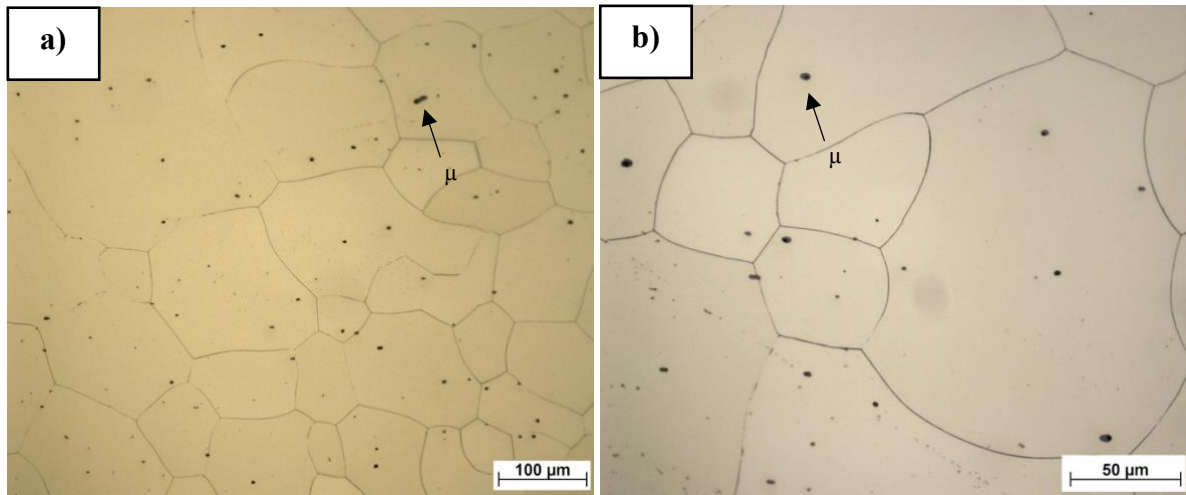


Fonte: Própria do autor.

5.3 Influência do Ni, Cr e Mo em altos teores na microestrutura dos aços alta liga E2(9Cr-7Mo) e ASTM 2205

A Figura 27 apresenta a micrografia ótica do aço alta liga E2(9Cr-7Mo), cuja microestrutura à temperatura ambiente apresenta uma matriz ferrítica devido ao alto teor de cromo e molibdênio na composição desse aço, os quais são elementos que restringem o crescimento do campo austenítico, assim como precipitados representados pelos pontos pretos que não pôde ser determinado com a análise no microscópio ótico. Segundo Herculano (2011), esses precipitados podem ser tanto a fase μ , a qual tem uma representação estrutural Fe_7Mo_6 em um sistema de liga Fe-Mo, assim como o carboneto $M_{23}C_6$.

Figura 27 – Micrografia ótica no estado como recebido do E2(9Cr-7Mo) (a)200x e (b)500x. Ataque químico: Nital 2%.

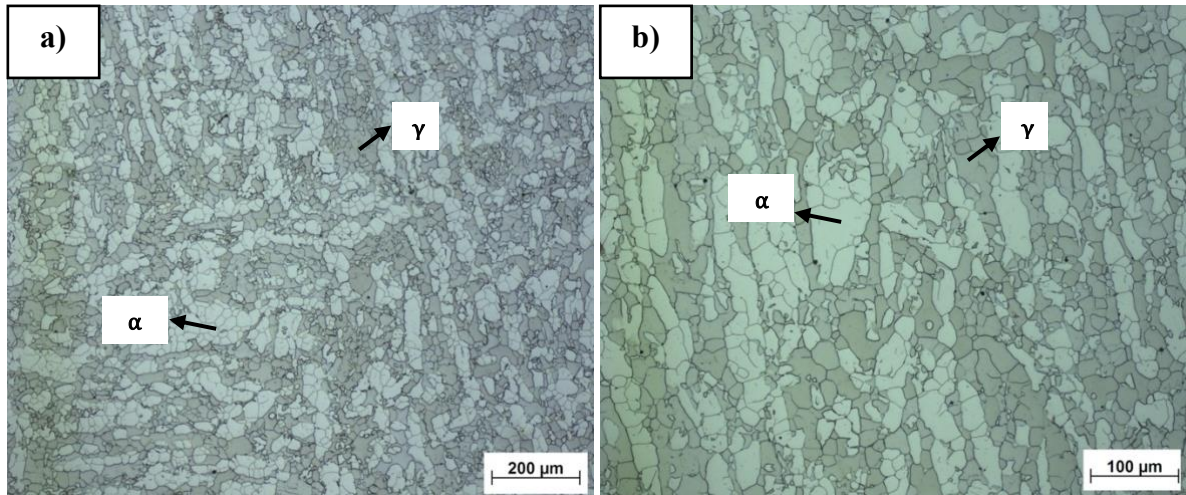


Fonte: Própria do autor.

Pode-se observar na micrografia ótica do ASTM 2205 (Figura 28) uma microestrutura que consiste de frações aproximadamente iguais das fases ferrita e austenita, o que caracteriza os aços inoxidáveis dúplex. Essa combinação dessas duas fases é obtida, em geral, pela elevação dos teores de cromo e molibdênio em relação aos aços austeníticos e um elevado teor de níquel, garantindo, dessa forma, a coexistência destas fases a temperatura ambiente.

Ao analisar a microestrutura dos aços alta liga em estudo, é possível visualizar a significativa influência que os elevados teores dos principais elementos de liga impactam na microestrutura de cada um desses aços, sendo o cromo e o molibdênio elementos que favorecem à estrutura ferrítica CCC, enquanto que o níquel estabiliza a estrutura austenítica à temperatura ambiente.

Figura 28 – Micrografia ótica no estado como recebido do ASTM 2205 (a)100x e (b)200x. Ataque eletroquímico: Ácido nítrico 40%.



Fonte: Própria do autor.

6 CONCLUSÃO

A partir das análises de como os principais elementos de liga afetam a microestrutura dos aços estudados, pode-se concluir que:

- A microestrutura dos aços carbono é afetada fortemente pelo teor de carbono nessas ligas, sendo a ferrita pró-eutetóide substituída gradativamente pelo microconstituente perlita à medida que se eleva a quantidade de C até o ponto eutetóide (0.8%pC), variando, dessa forma, de uma estrutura totalmente ferrítica no aço *Ultra Low Carbon* até uma microestrutura perlítica no AISI 1080;
- A proporção e distribuição das fases perlita e ferrita pró-eutetóide na microestrutura do aço AISI 4340 se assemelha a do AISI 1040, porém a adição dos elementos de liga Ni, Cr e Mo, mesmo que em baixos teores, acarretou na formação de um constituinte na estrutura do AISI 4340 que é ausente na liga AISI 1040. Mesmo com a velocidade de resfriamento baixa do tratamento térmico de normalização ao qual foi submetido, houve a formação desse microconstituente, a qual foi possivelmente causada pelo deslocamento para direita e deformação da curva do diagrama TRC em relação à curva do AISI 1040.
- A presença de altos teores de Ni, Cr e Mo afetam a microestrutura dos aços alta liga de forma que elevadas quantidades de cromo e molibdênio contidos na liga E2 (9Cr-7Mo) consolida uma microestrutura ferrítica. Além disso, um elevado teor de níquel, que estabiliza austenita à temperatura ambiente, com a adição de um alto teor de cromo e molibdênio, obtém-se uma combinação das fases ferrita e austenita em praticamente igual proporção no aço dúplex ASTM 2205.

REFERÊNCIAS

- ASHBY, M. F.; JONES, David. R. H. **Engineering Materials 2: an introduction to microstructure, processing and design**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- BRUNATTO, Silvio Francisco. **Introdução ao estudo dos aços**. 2016. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM052/Prof.Silvio/INTRODU%C3%87%C3%83O%20AO%20ESTUDO%20DOS%20A%C3%87OS-Parte%204.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2018
- CALLISTER, William D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC Editora, 2006.
- CARBÓ, Héctor Mario. **Aços inoxidáveis: aplicações e especificações**. São Paulo, SP: ArcelorMittal Inox Brasil, 2008.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2005.
- CHIAVERINI, Vicente. **GEOLOGIA E METALURGIA: Aços Carbono e Aços Ligas**. 16. ed. São Paulo, Sp: Universidade de São Paulo, 1954.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. 1. ed. São Paulo, SP: ABM, 2008.t
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo, SP: Edgar Blucher, 2008.
- DAVIS, J. R.. **ASM Specialty Handbook: Stainless steels**. Materials Park, OH: ASM International, 1994.
- FERRAZ, Henrique. O Aço na Construção Civil. **Revista Eletrônica de Ciências**, São Carlos, SP, n. 22, out./nov. 2003.
Disponível em:
<<https://www.ft.unicamp.br/~mariaacm/ST114/O%20A%C7O%20NA%20CONSTRU%C7%C3O%20CIVIL.pdf>>. Acesso: 01 mai. 2018.
- HERCULANO, Luís Flávio Gaspar. **Influência do teor de molibdênio na resistência à corrosão e formação de fases em ligas modelo Fe-Cr-Mo**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- MAKI, T.; TAMURA, I.; TSUZAKI, Kaneaki. **The morphology of microstructure composed of lath martensite in steels**. The Iron and Steel Institute of Japan, v. 20, p. 207-214, 1980.
- MALISKA, Ana Maria. **Microscopia Eletrônica de Varredura**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de caracterização microestrutural e análise de imagens. Apostila. Disponível em: <http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf>. Acesso em: 4 mai. 2018.
- PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E.. **Phase transformations in metals and alloys**. 2. ed. London: CRS Press, 2009.

SANTOS, Rezende Gomes dos. **Transformações de fases em materiais metálicos**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2006.

SILVA, André Luiz da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. Sumaré, Sp: Edgar Blucher, 2010.

VOORT, George F. Vander. **Atlas of time-temperature diagrams for irons and steels**. ASM International, 1991.

ZEEMANN, Annelise. **Aços baixa liga e alta liga**. 2016. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/a%C3%A7os-baixa-liga-e-alta-annelise-zeemann>>. Acesso em: 13 mai. 2018.

<http://www.durferrit.com.br/downloads/13_Diagrama%20Ferro-Carbono.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2018.

<<http://www.maxirate.com.br/processo-normalizacao.html>>. Acesso em: 13/05/2018.

<<http://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-4340-propriedades-mecanicas.html>>. Acesso em: 26 mai. 2018.