

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Conceitos Básicos sobre Sistemas de Ancoragem

2.1.1 Introdução

A procura por petróleo no mar começou no fim do século XIX, tendo sido utilizado como primeiro dispositivo um píer de madeira como suporte de equipamento de perfuração. Com o passar dos anos, a procura por petróleo no mar foi se intensificando e o caminho natural foi estender-se para águas mais profundas. O píer de madeira foi transformado em plataformas de madeira sem ligação com a costa, até que em 1934 surgiu a primeira plataforma fixa.

No fim da década de 70, surgiram as primeiras unidades semi-submersíveis e os primeiros navios ancorados a colunas articuladas utilizados para a produção de petróleo em águas profundas e fazendo com que os sistemas de ancoragem passassem a desempenhar importante papel na atividade *offshore*.

Ancoragens de unidades de produção e exploração de petróleo em lâminas d'água profundas utilizam algumas vezes sistemas mistos compostos por amarras, cabos de aço e cabos sintéticos. As amarras são componentes do sistema de ancoragem que vem sendo utilizados desde o início da produção de petróleo *offshore*. Sua localização nas linhas de ancoragem ocorre, principalmente no fundo do mar e junto à plataforma [5].

2.1.2 Princípios de Atuação de um Sistema de Ancoragem

Uma unidade flutuante posicionada em uma locação *offshore* está sujeita às forças das ondas, ventos e correntes marítimas. A finalidade de um sistema de ancoragem é restringir ao máximo os deslocamentos provenientes da atuação destas forças ambientais, permitindo que se opere equipamentos no fundo do mar.

O sistema de ancoragem deve ser capaz de restringir os movimentos em qualquer direção ao redor da unidade. Isso requer do sistema uma constituição com várias linhas de ancoragem bem distribuídas.

O tipo de sistema de ancoragem dependerá das características ambientais do local de instalação e das limitações impostas pelo *layout* submarino do campo em questão [5,6].

É mostrado na Figura 2.1 o esquema dos sistemas de ancoragem e prospecção de unidade do tipo FPSO (Floating Production Storage Offloading).



Figura 2.1- Esquema de um FPSO e seu sistema de ancoragem [7].

2.1.3 Amarras – Componente do Sistema de Ancoragem

Também conhecidas como correntes, foram os primeiros elementos de ancoragem utilizados na indústria *offshore*, juntamente com as âncoras. As primeiras plataformas de perfuração e navios sonda empregavam amarras utilizadas por navios mercantes.

Os elos das amarras dos sistemas de ancoragem são fabricados por um processo que envolve soldagem por centelhamento de barras circulares de aços estruturais. Posteriormente, sofrem tratamentos térmicos de têmpera e revenido, com a finalidade de aumentar sua resistência mecânica e tenacidade à fratura.

Em aplicações *offshore*, as amarras são classificadas em “graus”, que variam de acordo com a resistência à tração nominal da amarra. Para um mesmo

diâmetro de amarra, apenas a resistência à tração e a tenacidade se alteram quando se modifica o grau da amarra [5,6].

São mostrados na Figura 2.2 os elos para amarras de sistemas de ancoragem de unidade *offshore*.

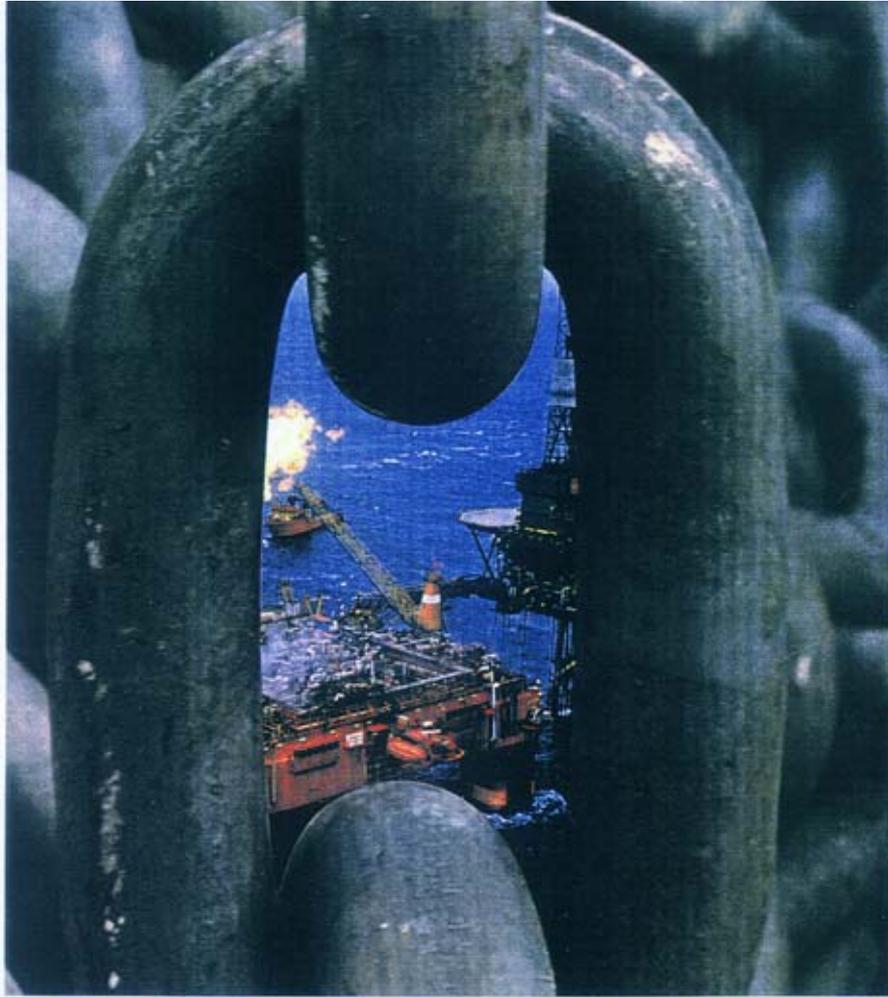


Figura 2.2 – Elos que compõem o sistema de ancoragem de unidade *offshore* [7].

2.2 Soldagem por Centelhamento

2.2.1 Introdução

O processo de centelhamento produz juntas soldadas através de dois princípios básicos: o emprego da resistência elétrica das superfícies a serem soldadas para gerar o calor necessário e a aplicação de uma força de recalçamento quando o aquecimento das superfícies atinge a temperatura ideal para o caldeamento. Esse processo é classificado como um processo de soldagem por resistência elétrica [8].

O processo de centelhamento pode ser empregado na maioria dos metais ferrosos e não ferrosos, bem como na produção de juntas de metais dissimilares.

2.2.2 Fundamentos Operacionais do Processo

- O material é fixado entre eletrodos apropriados, de maneira que as superfícies a serem soldadas estejam posicionadas no topo.
- O transformador elétrico é ligado, promovendo uma diferença de potencial entre as superfícies a serem soldadas.
- O eletrodo móvel é acionado e movimenta-se lentamente até que haja um contato leve entre as superfícies.
- Neste momento, inicia-se o fluxo de corrente através das pontes de contato e, conseqüentemente, uma elevação localizada de temperatura.

Quando a temperatura de fusão é atingida, as “pequenas” pontes fundem-se e são expulsas por forças magnéticas geradas pelo fluxo de corrente. É o chamado centelhamento (*flashing*), que tem como objetivo estabelecer um gradiente de temperatura estável por toda a superfície.

- O movimento do eletrodo é contínuo e , portanto, novas “pontes” são formadas e expulsas das superfícies.
- Quando suficiente quantidade de material foi consumida pelo centelhamento, o fluxo elétrico se dá através de toda a superfície, o que permite a formação de uma fina camada de metal fundido.
- Neste ponto da operação de soldagem, o eletrodo móvel é acelerado

por um dispositivo hidráulico, promovendo um contato mais forte entre as superfícies através da ação de uma força de recalçamento. Esta força é responsável pela expulsão da película de metal fundido, o que forma uma rebarba ao redor da junta soldada.

- O transformador elétrico é desligado em algum ponto pré-determinado da soldagem interrompendo a passagem de corrente pela junta

- Após a desenergização, os eletrodos são abertos e as peças removidas da máquina.

- O material extrudado (rebarbas) é retirado por meio de facas hidráulicas imediatamente após a soldagem [8].

2.3 Definição de Corrosão

2.3.1 Introdução

A corrosão de metais é definida como sendo a deterioração do material metálico por ação química ou eletroquímica do meio ambiente[9].

Para que haja corrente, é necessário que se tenha um circuito elétrico completo constituído de quatro componentes:

Anodo: eletrodo onde há reação de oxidação. É o emissor de elétrons.

Catodo: eletrodo onde há reação de redução. É o coletor de elétrons.

Eletrólito: Condutor contendo íons que transportam a corrente para o catodo

Circuito metálico: Ligação entre anodo e catodo

Portanto, retirando-se uma destas variáveis destrói-se a pilha eletroquímica e então a corrosão cessa. As pilhas eletroquímicas são dispositivos que permitem a transformação de energia química em energia elétrica e de energia elétrica em energia química [10].

O fenômeno da corrosão intensifica os danos causados ao material, podendo diminuir consideravelmente a resistência à fratura do componente e provocar sua falha de maneira prematura. Com o intuito de aumentar a durabilidade e confiabilidade dos sistemas de ancoragem *offshore*, faz-se necessário o conhecimento da reação dos materiais a solicitações mecânicas em ambiente salino e quantificar o acúmulo de dano causado por este ambiente.

Quanto ao fator econômico, a corrosão provoca o desgaste das reservas mundiais de minérios e consome energia útil. Cerca de $\frac{1}{4}$ da produção anual mundial de ferro é utilizada para substituir material destruído por corrosão, o que representa maior consumo de minério de ferro e de energia [10]. Além disto, o problema da corrosão metálica apresenta proporções significativas, ou seja, foi estimado que aproximadamente 5% da receita de uma nação industrializada são gastos na prevenção da corrosão e na manutenção e substituição de produtos perdidos [10].

Portanto, os problemas de corrosão são freqüentes e de certa forma estão nas mais variadas atividades, pois todos os materiais estão sujeitos a um ataque corrosivo se o meio for agressivo.

2.3.2 Potencial de Eletrodo

Os metais ao reagirem têm a tendência a perder elétrons, sofrendo oxidação e conseqüentemente, corrosão. Verifica-se experimentalmente que os metais apresentam diferentes tendências à oxidação. Portanto, para o estudo ou previsão de alguns processos corrosivos é importante dispor de uma tabela que indica a ordem preferencial de cessão de elétrons. Esta tabela é conhecida como tabela de potenciais de eletrodo, e está apresentada na Figura 2.3 [10].

Potencial de Oxidação E° (V)	Reação do Eletrodo	Potencial de Redução E° (V)	Potencial de Oxidação E° (V)	Reação do Eletrodo	Potencial de Redução E° (V)
<i>Solução Aquosa Ácida</i>			<i>Solução Aquosa Ácida (Continuação)</i>		
+3,09	$3/2 N_2 + e \rightleftharpoons N_2^+$	-3,09	-0,564	$MnO_4^- + e \rightleftharpoons MnO_4^{2-}$	+0,564
+3,045	$Li^+ + e \rightleftharpoons Li$	-3,045	-0,682	$O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2O_2$	+0,682
+2,925	$K^+ + e \rightleftharpoons K$	-2,925	-0,72	$H_2O_2 + H^+ + e \rightleftharpoons OH + H_2O$	+0,72
-2,925	$Rb^+ + e \rightleftharpoons Rb$	-2,925	-0,771	$Fe^{3+} + e \rightleftharpoons Fe^{2+}$	+0,771
+2,89	$Sr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sr$	-2,89	-0,789	$Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2Hg$	+0,789
+2,87	$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca$	-2,87	-0,799	$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag$	+0,799
+2,714	$Na^+ + e \rightleftharpoons Na$	-2,714	-0,8	$Rh^{3+} + 3e \rightleftharpoons Rh$	+0,8
+2,52	$La^{3+} + 3e \rightleftharpoons La$	-2,52	-0,920	$2Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg_4^{2+}$	+0,920
-2,48	$Ce^{4+} + 3e \rightleftharpoons Ce$	-2,48	-0,987	$Pu^{4+} + 2e \rightleftharpoons Pu^{2+}$	+0,987
+2,37	$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg$	-2,37	-1,065	$Br_2(l) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	+1,065
+2,37	$Y^{3+} + 3e \rightleftharpoons Y$	-2,37	-1,229	$O_2 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$	+1,229
+2,25	$1/2 H_2 + e \rightleftharpoons H^-$	-2,25	-1,33	$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7 H_2O$	+1,33
+2,08	$Sc^{3+} + 3e \rightleftharpoons Sc$	-2,08	-1,360	$Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	+1,360
+2,07	$Pu^{4+} + 3e \rightleftharpoons Pu$	-2,07	-1,50	$Au^{3+} + 3e \rightleftharpoons Au$	+1,50
+1,85	$Be^{2+} + 2e \rightleftharpoons Be$	-1,85	-1,5	$HO_2 + H^+ + e \rightleftharpoons H_2O_2$	+1,5
+1,80	$U^{3+} + 3e \rightleftharpoons U$	-1,80	-1,51	$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	+1,51
+1,66	$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al$	-1,66	-1,63	$HClO + H^+ + e \rightleftharpoons 1/2 Cl_2 + H_2O$	+1,63
+1,63	$Ti^{4+} + 2e \rightleftharpoons Ti$	-1,63	-1,7	$Au^+ + e \rightleftharpoons Au$	+1,7
+1,53	$Zr^{4+} + 4e \rightleftharpoons Zr$	-1,53	-1,77	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2H_2O$	+1,77
+1,18	$Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn$	-1,18	-1,82	$Co^{3+} + e \rightleftharpoons Co^{2+}$	+1,82
+1,1	$Nb^{5+} + 3e \rightleftharpoons Nb$	-1,1	-1,9	$FeO_4^{2-} + 8H^+ + 3e \rightleftharpoons Fe^{2+} + 4H_2O$	+1,9
+0,89	$TiO^{2+} + 2H^+ + 4e \rightleftharpoons Ti + H_2O$	-0,89	-1,98	$Ag^{2+} + e \rightleftharpoons Ag^+$	+1,98
+0,81	$Ta_2O_5 + 10H^+ + 10e \rightleftharpoons 2Ta + 5H_2O$	-0,81	-2,07	$O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons O_2 + H_2O$	+2,07
+0,763	$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn$	-0,763	-2,65	$F_2 + 2e \rightleftharpoons 2F^-$	+2,65
+0,74	$Cr^{3+} + 3e \rightleftharpoons Cr$	-0,74	-2,8	$OH + H^+ + e \rightleftharpoons H_2O$	+2,8
+0,65	$Nb_2O_5 + 10H^+ + 10e \rightleftharpoons 2Nb + 5H_2O$	-0,65	-3,00	$F_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2HF$ (aquoso)	+3,00
+0,53	$Ga^{3+} + 3e \rightleftharpoons Ga$	-0,53			
+0,440	$Fe^{3+} + 2e \rightleftharpoons Fe$	-0,440			
-0,41	$Cr^{3+} + e \rightleftharpoons Cr^{2+}$	-0,41			
+0,403	$Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd$	-0,403	+2,69	$Mg(OH)_2 + 2e \rightleftharpoons Mg + 2OH^-$	-2,69
+0,37	$Ti^{3+} + e \rightleftharpoons Ti^{2+}$	-0,37	+2,35	$H_2AlO_4^- + H_2O + 3e \rightleftharpoons Al + 4OH^-$	-2,35
+0,342	$In^{3+} + 3e \rightleftharpoons In$	-0,342	+1,70	$SiO_4^{4-} + 3H_2O + 4e \rightleftharpoons Si + 6OH^-$	-1,70
-0,3363	$Tl^+ + e \rightleftharpoons Tl$	-0,3363	+1,3	$Cr(OH)_3 + 3e \rightleftharpoons Cr + 3OH^-$	-1,3
+0,277	$Co^{3+} + 2e \rightleftharpoons Co$	-0,277	+1,245	$Zn(OH)_2 + 2e \rightleftharpoons Zn + 2OH^-$	-1,245
+0,255	$V^{3+} + e \rightleftharpoons V^{2+}$	-0,255	+1,216	$ZnO_2^{2-} + 2H_2O + 2e \rightleftharpoons Zn + 4OH^-$	-1,216
+0,250	$Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni$	-0,250	+1,05	$MoO_4^{2-} + 4H_2O + 6e \rightleftharpoons Mo + 8OH^-$	-1,05
+0,2	$Mo^{3+} + 3e \rightleftharpoons Mo$	-0,2	+1,0	$Int(OH)_3 + 3e \rightleftharpoons In + 3OH^-$	-1,0
+0,136	$Sn^{4+} + 2e \rightleftharpoons Sn$	-0,136	+0,90	$Sn(OH)_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons HSnO_2^- + H_2O + 3OH^-$	-0,90
-0,13	$O_2 + H^+ + e \rightleftharpoons HO_2$	-0,13	+0,877	$Fe(OH)_2 + 2e \rightleftharpoons Fe + 2OH^-$	-0,877
-0,126	$Pb^{4+} + 2e \rightleftharpoons Pb$	-0,126	+0,828	$2H_2O + 2e \rightleftharpoons H_2 + 2OH^-$	-0,828
+0,09	$WO_3 + 6H^+ + 6e \rightleftharpoons W + 3H_2O$	-0,09	+0,56	$Fe(OH)_3 + e \rightleftharpoons Fe(OH)_2 + OH^-$	-0,56
0,000	$2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2$	0,000	+0,56	$O_2 + e \rightleftharpoons O_2^-$	-0,56
-0,1	$TiO^{2+} + 2H^+ + e \rightleftharpoons Ti^{3+} + H_2O$	+0,1	+0,54	$HPbO_2^- + H_2O + 2e \rightleftharpoons Pb + 3OH^-$	-0,54
-0,102	$Si + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons SiH_4$	+0,102	+0,48	$S + 2e \rightleftharpoons S^{2-}$	-0,48
-0,13	$C + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons CH_4$	+0,13	+0,24	$HO_2^- + H_2O + e \rightleftharpoons OH + 2OH^-$	-0,24
-0,141	$S + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2S$	+0,141	+0,13	$CrO_4^{2-} + 4H_2O + 3e \rightleftharpoons Cr(OH)_3 + 5OH^-$	-0,13
-0,15	$Sn^{4+} + 2e \rightleftharpoons Sn^{2+}$	+0,15	+0,12	$Cu(NH_3)_2^+ + e \rightleftharpoons Cu + 2NH_3$	-0,12
-0,152	$Sb_2O_3 + 6H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Sb + 3H_2O$	+0,152	+0,076	$O_2 + H_2O + 2e \rightleftharpoons HO_2^- + OH^-$	-0,076
-0,153	$Cu^{2+} + e \rightleftharpoons Cu^+$	+0,153	+0,017	$AgCN + e \rightleftharpoons Ag + CN^-$	-0,017
-0,16	$BiOCl + 2H^+ + 3e \rightleftharpoons Bi + H_2O + Cl^-$	+0,16	-0,4	$O_2 + H_2O + e \rightleftharpoons OH^- + HO_2^-$	+0,4
-0,222	$AgCl + e \rightleftharpoons Ag + Cl^-$	+0,222	-0,401	$O_2 + 2H_2O + 4e \rightleftharpoons 4OH^-$	+0,401
-0,32	$BiO^+ + 2H^+ + 3e \rightleftharpoons Bi + H_2O$	+0,32	-0,88	$HO_2^- + H_2O + 2e \rightleftharpoons 3OH^-$	+0,88
-0,337	$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu$	+0,337	-0,89	$ClO^- + H_2O + 2e \rightleftharpoons Cl^- + 2OH^-$	+0,89
-0,45	$H_2SO_3 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons S + 3H_2O$	+0,45	-0,9	$FeO_4^{2-} + 2H_2O + 3e \rightleftharpoons FeO_2^- + 4OH^-$	+0,9
-0,521	$Cu^+ + e \rightleftharpoons Cu$	+0,521	-1,24	$O_2 + H_2O + 2e \rightleftharpoons O_2 + 2OH^-$	+1,24
-0,536	$I_2 + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	+0,536	-2,0	$OH + e \rightleftharpoons OH^-$	+2,0

Figura 2.3 – Tabela de Potenciais de Eletrodo [10].

O potencial de eletrodo mostra a tendência de uma reação se passar no eletrodo, isto é, dá a medida da facilidade com que os átomos do eletrodo metálico ou da facilidade com que os íons recebem elétrons.

O potencial, medido em volts, desenvolvido em um metal imerso em uma solução 1M de seus íons, é chamado de potencial padrão. A medida de um potencial não pode ser realizada sem um valor de referência ou potencial padrão. Pode-se medir o potencial de um eletrodo ligando-o a um segundo eletrodo tomando como referência. Devido à diferença de potenciais desses eletrodos, haverá um fluxo de elétrons do eletrodo de maior potencial para o outro.

2.3.2.1 Eletrodos de Referência

Além do eletrodo de Hidrogênio, que é constituído de um fio de platina coberto com platina finamente dividida que adsorve grande quantidade de hidrogênio, podem ser usados outros eletrodos de referência tais como: calomelano, que consiste em mercúrio em contato com cloreto mercurioso e uma solução de cloreto de potássio; prata-cloreto de prata, que consiste em um fio de platina revestido de prata; cobre-sulfato de cobre, que consiste em cobre metálico imerso em solução saturada de cobre. Esses eletrodos são chamados de eletrodos de oxirredução ou eletrodos redox [10].

2.3.3 Heterogeneidades Responsáveis por Corrosão Eletroquímica

A corrosão eletroquímica é verificada sempre que existem heterogeneidades no material metálico e no meio corrosivo [10].

1)Material Metálico:

- Contornos de grão: Nos limites dos grãos cristalinos, os átomos apresentam certo desarranjo decorrente do encontro entre os grãos, o que apresenta certas imperfeições no interior dos cristais. Algumas experiências mostram que os contornos de grão funcionam como área anódica em relação ao grão. Daí o ataque preferencial do contorno dos grãos em muitas ligas e metais;
- Orientação dos grãos: os grãos orientados em diferentes direções devem apresentar diferentes potenciais;

- Diferença de tamanho dos grãos: um grão fino possui maior energia interna do que um grão grosseiro, logo, espera-se diferentes potenciais para essas espécies;

- Tratamentos térmicos/ metalúrgicos diferentes: se uma região do material sofre tratamento térmico diferente de outras regiões, ocorre uma diferença de potencial entre essas regiões. Esta é uma situação comum quando das soldagem de peças metálicas, já que o aquecimento local resulta da modificação da natureza das fases presentes ou de suas composições, dando condições para a criação de diferença de potencial.

2) Superfície Metálica:

- Polimento da superfície metálica: superfícies altamente polidas podem apresentar potenciais diferentes das superfícies rugosas. Essa diferença pode ser devido ao fato de a película formada em superfícies rugosas ser menos contínua do que a formada em superfícies lisas.

- Presença de escoriações e abrasões: o material metálico forma películas com características protetoras. Riscando-se essa superfície há destruição da película, funcionando a área riscada como área anódica, portanto sujeita a destruição.

- Bordas de superfícies metálicas: são regiões mais susceptíveis ao ataque eletroquímico, tornando-se áreas anódicas.

-Diferença de Forma: a forma de um material metálico pode ocasionar problemas de corrosão, por exemplo: fios de diâmetros pequenos se corroem mais rapidamente do que fios de diâmetros maiores.

- Deformações Diferenciais: Qualquer parte de um material metálico sujeito a deformações pode apresentar potencial diferente daquele de uma parte não-deformada.

3) Meio Corrosivo:

- Concentração diferencial: quando o material metálico está imerso em soluções com diferentes concentrações;

- Aeração diferencial: quando um material metálico está imerso em regiões com aerações diferentes. É uma corrosão localizada típica de tubulações.

2.3.4 Variáveis do Processo de Corrosão

As variáveis principais do processo de corrosão são descritas a seguir [10]:

- Variáveis dependentes do material metálico: composição química, processo de obtenção, presença de impurezas, tratamentos térmicos, condições de superfície, forma;
- Variáveis dependentes do meio corrosivo: composição química, concentração, impurezas, pH, teor de oxigênio, temperatura, pressão;
- Variáveis dependentes da forma do emprego: meios de proteção contra a corrosão, solicitações mecânicas, movimento relativo entre material metálico e meio, condições de imersão no meio.

2.3.5 Taxa de Corrosão

Os sistemas reais quando submetidos a processos corrosivos, considerando a natureza eletroquímica destes processos em água do mar, não estão em equilíbrio, e portanto existirá um fluxo de elétrons do anodo para o catodo [9].

A taxa de corrosão ou a taxa de remoção de material é um parâmetro importante da corrosão. Tal parâmetro pode ser expresso como a taxa de penetração da corrosão (TPC) ou a perda de espessura do material por unidade de tempo.

A fórmula para esse cálculo é:

$$TPC = KW / \rho At \quad (1)$$

Onde W é a perda de peso do material após um tempo t de exposição, ρ é a densidade do material, A é a área exposta à corrosão e K é uma constante equivalente a 534 ou 87,6 para que a TPC seja expressa em milésimo de polegada por ano (mpa) ou em milímetro por ano (mm/ano), respectivamente.

Para a maioria das aplicações, uma taxa de corrosão de 20mpa (0,50mm/ano) é aceitável [9].

Uma vez existindo uma corrente elétrica associada com as reações de corrosão eletroquímicas, pode-se expressar a taxa de corrosão em termos da corrente, ou mais especificamente em termos da densidade de corrente, isto é, da corrente por unidade de área superficial do material que está sofrendo corrosão e que é designada por *i*.

A taxa de corrosão, r , em unidades de $\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ é determinada utilizando a expressão:

$$r = i / nF \quad (2)$$

onde F é a constante de Faraday que equivale a 96500C/mol e n é o número de elétrons associados à ionização de cada átomo metálico

A taxa de corrosão representa a perda de massa do material metálico em função do tempo por unidade de área. Esta vai ser diretamente proporcional à intensidade da corrente de corrosão, que depende do potencial do elemento de corrosão e da resistividade dos circuitos metálico e eletrolítico [10].

2.3.6 Meios Corrosivos e Formas de Corrosão

Os meios corrosivos mais frequentemente encontrados são: atmosfera, águas naturais, água do mar, solo, produtos químicos, alimentos e substâncias fundidas.

A água do mar dentre os agentes corrosivos naturais é um dos mais agressivos, pois contendo concentrações elevadas de sais, funciona como um eletrólito forte, permitindo um processo eletroquímico com elevada taxa de corrosão.

As diferentes formas de destruição provocadas pela corrosão podem ser classificadas em: corrosão uniforme, em placas, alveolar, por pite, transgranular e intragranular [10].

2.3.7 Principais Tipos de Corrosão Eletroquímica

2.3.7.1 Corrosão Galvânica

O contato entre metais dissimilares imersos em uma solução corrosiva ou condutora promove a diferença de potencial entre os metais. A corrosão do metal menos resistente aumenta e a do metal mais resistente diminui, comparada com seu comportamento quando não estão em contato. O metal mais resistente torna-se

catodo e o menos resistente torna-se o anodo. Tem-se então o tipo de corrosão chamada de galvânica. É caracterizada por ter corrosão localizada, ocasionando perfurações no material metálico[9,10].

Se dois metais dissimilares estão em contato em um eletrólito condutor, os fatores que determinam a corrosão deste par são: os potenciais de corrosão dos dois metais no eletrólito, as reações catódicas e anódicas e suas cinéticas, as áreas superficiais dos dois metais e a natureza e condutividade do eletrólito

2.3.7.2 Corrosão Intergranular

Forma de ataque localizado na superfície metálica, na qual um caminho estreito é corroído preferencialmente ao longo dos contornos de grãos. A força motriz é a diferença no potencial de corrosão que se desenvolve entre uma zona fina do contorno de grão e o volume dos grãos adjacentes.

Tratamentos térmicos e trabalho à frio de ligas não somente afetam o tamanho e forma dos grãos mas também a composição, localização, quantidade e tamanho dos constituintes intermetálicos. Tratamentos térmicos, como solubilização de uma liga seguido de têmpera, levam a supersaturação de elementos de liga em solução sólida. Posteriormente, estes elementos tem a tendência para precipitar como constituintes intermetálicos e dependendo da composição e localização destes constituintes precipitados, eles podem tornar-se a causa da corrosão intergranular [11].

A sensitização é um fenômeno no qual, durante o lento resfriamento dos aços inoxidáveis austeníticos através da faixa de temperatura de 550 – 850^oC, precipitados frágeis e finos de um carbeto rico em cromo nucleiam e posteriormente precipitam nos contornos de grãos. Durante a precipitação deste carbeto, contendo de 70-80% de cromo, a matriz adjacente aos contornos de grãos torna-se empobrecida em cromo e os teores de cromo nestas regiões caem abaixo de 12%, concentração necessária na solução sólida para conferir resistência à corrosão. O grau de sensitização e susceptibilidade à corrosão intergranular depende do tempo de permanência do material na faixa de temperatura crítica, da velocidade de resfriamento, bem como da composição da liga.

O aço quando é submetido, em um dado tempo a uma temperatura que o torna sujeito a uma corrosão intergranular, diz-se que o aço está sensitizado ou

sensibilizado. A extensão da sensitização, em uma dada temperatura e em um dado tempo, depende muito do teor de carbono no aço. No caso de aços inoxidáveis, a corrosão intergranular deve ser considerada quando esses materiais passam por um tratamento térmico prolongado em temperaturas inferiores a 500°C, ou aquecimentos rápidos em temperaturas entre 500°C– 950°C, como por exemplo na soldagem [10,11].

A soldagem de alguns aços austeníticos pode torná-los sujeitos à corrosão intergranular. A região de sensitização como fica situada a alguns milímetros em torno do cordão de solda, então quando esse material é colocado em meios corrosivos, há uma ataque localizado nessa região próxima à solda, devido ao empobrecimento da matriz em cromo [10].

2.3.8 Polarização

Um problema de grande importância nos processos corrosivos é a determinação de velocidade com que se processa a corrosão. Um fator de certa predominância é o valor da diferença de potencial entre os dois metais. Um metal acoplado a outro metal, próximos na tabela de potencial será corroído mais lentamente do que metais mais afastados da tabela de potenciais. Logo, quanto mais alta for a diferença de potencial, maior será a força motriz que provoca a corrosão.

A polarização, então, é o deslocamento de cada potencial de eletrodo do seu valor das condições de equilíbrio e a magnitude desse deslocamento é a sobrevoltagem, representada pelo símbolo η e expressa em Volts ou miliVolts.

Há três tipos de polarização que são:

1) Polarização por ativação

É a polarização causada por uma lenta reação do eletrodo. Os aços de alta resistência, devido à ductilidade limitada são mais sujeitos ao trincamento por hidrogênio do que os aços de baixa resistência [9,10].

2) Polarização por concentração

É devida à variação de concentração nas vizinhanças do eletrodo.

3) Polarização por resistência.

2.3.9 Passivação

Alguns metais podem apresentar comportamento diferente daquele previsto pela sua posição na tabela de potenciais.

Nas condições em que o material torna-se passivo, o seu potencial fica mais nobre, ou seja, menos ativo do que usualmente, e com isso o material sofre corrosão mais lenta. Este fenômeno é exibido pelo cromo, ferro, níquel, titânio e muitas das ligas desses metais.

Acredita-se que esse comportamento passivo resulte da formação de uma película de óxido muito fina e aderente à superfície do metal, servindo como barreira de proteção contra a corrosão adicional. Os aços inoxidáveis são resistentes à corrosão devido a essa passivação, pois eles contém 11% de cromo o que minimiza o produto de corrosão.

Um metal pode experimentar um comportamento tanto ativo quanto passivo, dependendo do ambiente corrosivo.

A passivação melhora a resistência à corrosão e é conseguida por oxidação usando-se substâncias convenientes ou por oxidação anódica.

A passividade de um metal pode ser destruída por substâncias redutoras, redução catódica e íons halogenetos [9,10].

2.3.10 Influências na Taxa de Corrosão em Materiais Ferrosos

1) Efeito do oxigênio dissolvido

Para que uma água neutra, em temperaturas normais, ataque o ferro, é necessário que ela contenha oxigênio dissolvido. A taxa de corrosão no início é rápida, diminuindo com a formação da camada de óxido, pois vai funcionar como uma barreira.

2) Efeito do pH

Com o pH variando entre 4 e 10, a taxa de corrosão independe do pH. Com valores de pH superiores a 10, o aumento da alcalinidade do meio, eleva o pH da superfície do ferro e a taxa de corrosão diminui.

Para valores de pH inferiores a 4, a difusão do oxigênio não é fator de controle, sendo mais responsável pela velocidade de reação de corrosão, a facilidade de despreendimento de hidrogênio.

3) Efeito da Temperatura

O aumento da temperatura acelera a corrosão, pois diminui a polarização catódica e aumenta a condutividade do eletrólito e da velocidade de difusão.

4) Efeito de sais dissolvidos

Os sais podem agir acelerando ou retardando a velocidade de corrosão. O ferro é mais corroído em soluções diluídas de NaCl, pois a dissolução do oxigênio pode atingir as áreas catódicas, ocasionando a despolarização.

5) Efeito da velocidade

Quando o condutor eletrolítico está em movimento, a taxa de corrosão varia. Em alguns casos, o movimento pode ser benéfico, pois faz a composição ficar mais homogênea e o teor de oxigênio impede a formação de pilhas, diminuindo a taxa de corrosão [10].

2.3.11 Efeitos do Meio Ambiente na Vida Útil dos Materiais

Danos causados pelo ambiente de trabalho, principalmente em instalações do tipo *offshore*, devem ser consideradas de fundamental importância na vida útil de componentes mecânicos [12].

Ao projetar um determinado equipamento, componente ou até mesmo uma estrutura, o engenheiro responsável pelo projeto deverá ter a preocupação de verificar a natureza do ambiente ao qual os mesmos estarão submetidos. Com a definição deste parâmetro, será possível controlar e minimizar os efeitos provocados pela atividade química naturalmente imposta pelo ambiente de trabalho em que os componentes ou estruturas estarão submetidos.

Em ambientes agressivos, o processo de fratura de uma estrutura submetida a uma tensão estática e cíclica é em geral referido como corrosão induzida por sollicitação mecânica. Este processo é dependente do tempo e requer a ação conjunta de uma tensão, seja residual e/ ou aplicada, de um meio corrosivo

e de um material susceptível à corrosão sob tensão neste meio. Neste caso, a trinca propaga-se sob um carregamento inferior ao necessário para provocar a fratura do material ao ar.

2.3.12 Controle da Corrosão

O conhecimento do mecanismo das reações envolvidas nos processos corrosivos é um pré-requisito para um controle efetivo dessas reações. Nem o controle, nem a corrosão podem ser tratados separadamente[10].

Os métodos práticos adotados para diminuir a taxa de corrosão podem ser esquematizados da seguinte forma: métodos baseados na modificação dos parâmetros operacionais, métodos baseados na modificação do meio corrosivo, métodos baseados na modificação do metal, métodos baseados em revestimentos protetores e métodos eletroquímicos.

As medidas práticas mais usadas no controle da corrosão são as modificações nos meios corrosivos, modificações nas propriedades dos metais e emprego de revestimentos protetores.

2.4 Microestruturas da ZTA

2.4.1 A Transformação de Austenita para Ferrita

Sob condições de equilíbrio, a ferrita pró-eutetóide é formada em ligas Fe-C que contêm acima de 0,8% de carbono. A reação ocorre a 910°C no ferro puro mas fica entre 910° e 723°C nas ligas Fe-C. Entretanto, pelo resfriamento no estado austenítico para temperaturas abaixo da temperatura eutetóide A_{e1} , a ferrita pode ser formada à temperaturas abaixo de 600°C .

Como resultado do comportamento dos aços carbono, Dubé [13] propôs uma classificação das morfologias de ferrita, que ocorre conforme a temperatura de transformação austenita/ferrita é diminuída. Dubé reconheceu quatro bem definidas morfologias:

(1) Ferrita alotriomórfica de contorno de grão: Há cristais que nucleiam nos contornos de grão da austenita à temperaturas altas ($800\text{-}850^{\circ}\text{C}$), como mostrada na Figura 2.4 a. .

(2) Ferrita de Widmanstätten: Nucleiam nos contornos de grão da austenita, mas crescem ao longo da matriz. Elas crescem diretamente dos contornos ou nucleiam em uma ferrita alotriomórfica pré-existente, como mostrada na Figura 2.4 b.

(3) Ferrita intragranular: Cristais equiaxiais que nucleiam dentro dos grãos da austenita e possuem contornos irregulares, como mostrada na Figura 2.4 c.

(4) Ripas Intragranular: Estas ripas são similares às que crescem dos contornos de grão, mas elas nucleiam totalmente dentro dos grãos da austenita, como mostrada na Figura 2.4d.

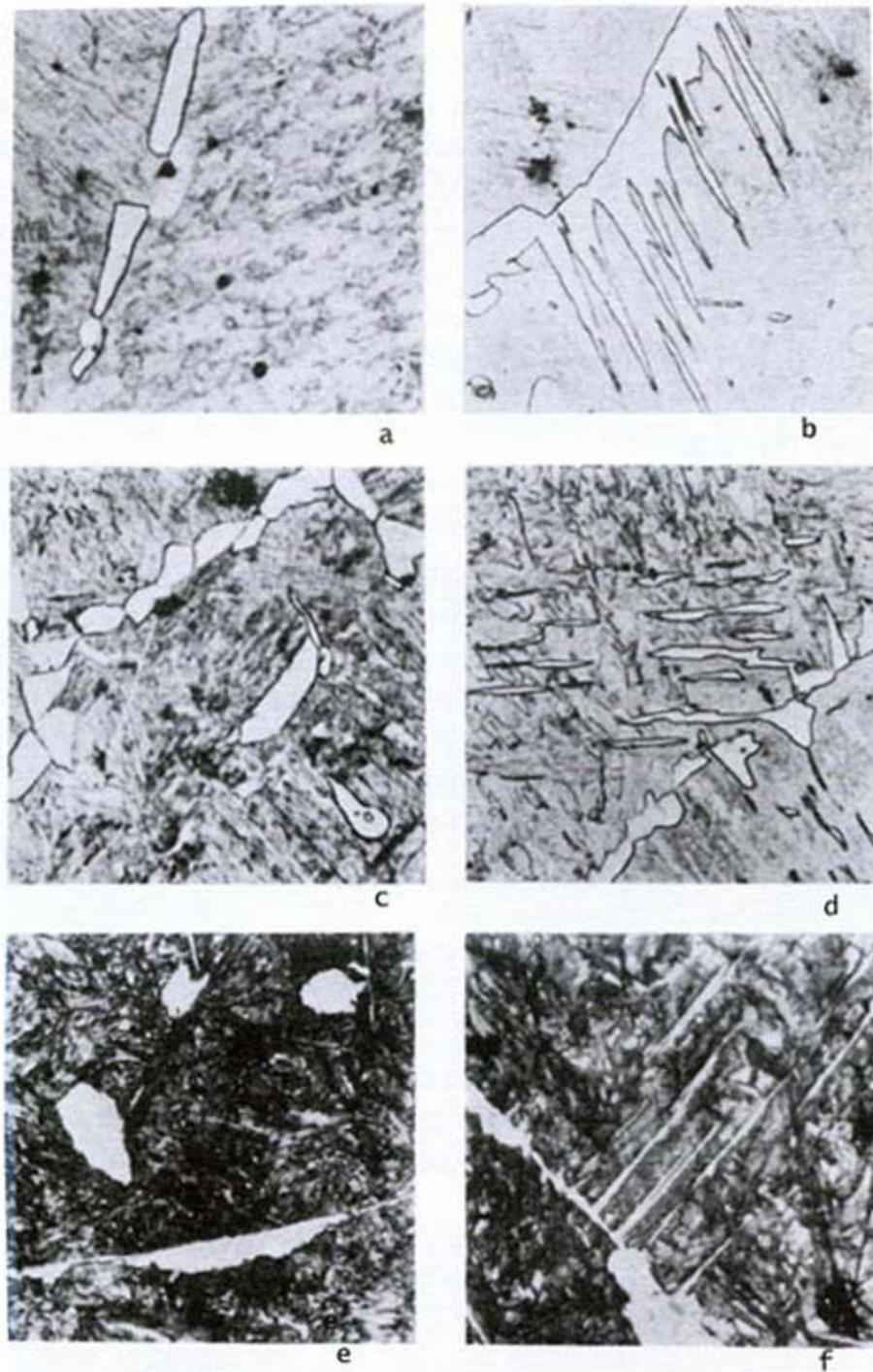


Figura 2.4- Classificação das morfologias de ferrita [13].

A ferrita alotriomórfica de contorno de grão é a primeira morfologia a aparecer em toda a faixa de composição e temperatura. Entretanto, a altas temperaturas (acima de 800°C) elas crescem ao longo dos contornos de grão e também dentro dos grãos.

Se o conteúdo de carbono é muito alto (> 0,4%), as regiões de perlita são grandes o suficiente para prevenir o crescimento das ripas de ferrita. Entretanto se o conteúdo de carbono é abaixo de 0,2%, a ferrita alotriomórfica minimiza o crescimento de ferrita de Widmanstätten. Porém, o fator mais importante é a temperatura de crescimento da ferrita, que é determinada pela taxa de resfriamento do aço [13].

2.4.2 A Zona Termicamente Afetada

Quando há soldagem por fusão, o material das chapas tem de ser aquecidos até o ponto de fusão e depois resfriado rapidamente sob condições impostas pela geometria da junta. Como resultado deste severo ciclo térmico, a microestrutura original e propriedades do metal de solda são modificadas. Este volume de metal, ou zona é chamada de Zona Termicamente Afetada (ZTA) [14].

As ZTA's em aços transformáveis são complexas e as microestruturas que foram continuamente resfriadas podem ser categorizadas em pequenas unidades de constituintes microestruturais como ferrita de contorno de grão, ferrita de Widmanstätten, martensita e etc. A transformação da austenita para ferrita ocorrendo durante o resfriamento foi assumida há muito como sendo iniciada somente nos contornos de grão da austenita, mas esta visão hoje mudou [15].

A ZTA pode ser dividida em número de sub-zonas ou zonas e cada sub-zona refere-se a um diferente tipo de microestrutura e o mais importante, cada tipo estrutural é como se tivesse diferentes propriedades mecânicas. O tipo de estrutura e o tamanho das sub-zonas são determinadas pelo ciclo térmico, ou seja, o completo ciclo de aquecimento e resfriamento [14].

2.4.2.1 Transformações Durante o Resfriamento

O tipo e a fração volumétrica dos produtos de transformação dependem de vários fatores, incluindo o tamanho de grão da austenita, temperatura de pico, taxa de resfriamento, elementos de liga presentes. Entretanto, o alto teor de carbono equivalente do metal de base comparando com o metal de solda tende a mover as

curvas do diagrama TTT para tempos longos, aumentando a probabilidade de formação de martensita [14,16,17].

-Zona de crescimento de grão:

Região onde as temperaturas foram suficientes para haver dissolução de precipitados dentro do campo austenítico. A ferrita pró-eutetóide se precipita nos contornos de grão. Em aços com baixo carbono equivalente, a ferrita pro-eutetóide (fase clara), que cobre os contornos de grão são figuras proeminentes, mas alto teor de carbono equivalente tende a reduzi-la por abaixar a temperatura dos produtos de transformação, particularmente a ferrita de Widmanstätten. A martensita se forma a altos valores de carbono equivalente e concentra-se no meio dos grãos, como é mostrado nas Figuras 2.5(a) e (b).

-Zona de refinamento de grão:

A redução da temperatura de pico nesta zona implica que seguindo a transformação ferrita -austenita durante o aquecimento, a austenita não tem tempo de se desenvolver apropriadamente e o tamanho de grão continua muito pequeno. A transformação de austenita para ferrita no resfriamento, portanto, tende a produzir uma granulação fina de ferrita-perlita, dependendo da energia de soldagem e da velocidade de resfriamento. A grande área de contorno de grão tende a promover a nucleação de ferrita e austenita que permanece no centro do grão é rica em carbono e dependendo da velocidade de resfriamento, transforma-se para perlita, como é mostrado na Figura 2.5(c).

-Zona parcialmente transformada:

Região onde ocorre austenitização parcial. Na faixa de temperatura entre 750° - 900° C, a perlita no metal de base rapidamente austenitiza devido ao abaixamento da temperatura de transformação, a austenita fica enriquecida em carbono e manganês. Por esta razão, a transformação austenita-ferrita no resfriamento pode levar a várias possíveis estruturas, dependendo da taxa de resfriamento (bainita superior, perlita, martensita autorevenida ou martensita com alto teor de carbono), como é mostrado na Figura 2.5(d).

-Zona de esferoidização de carbetos:

Corresponde a aproximadamente à faixa de temperatura de 700-750° C. Há uma pequena transformação da ferrita-austenita durante o rápido ciclo térmico, então a mais notável mudança é a degradação das lamelas de perlita para

partículas esferoidais de cementita (fase escura), como é mostrado na Figura 2.5(d).

-Zona de material de base sem mudanças:

Região do metal base em que as temperaturas atingidas não são suficientes para provocar mudanças na microestrutura. As temperaturas na faixa de 650° C, onde a modificação na morfologia dos constituintes não parece ocorrer. Entretanto, a combinação do efeito de aquecimento e tensão residual pode causar um envelhecimento, como é mostrado na Figura 2.5(e). Este fenômeno é associado com o movimento de discordâncias no resfriamento, o soluto enriquece de discordâncias não trancadas, o que fragiliza a estrutura.

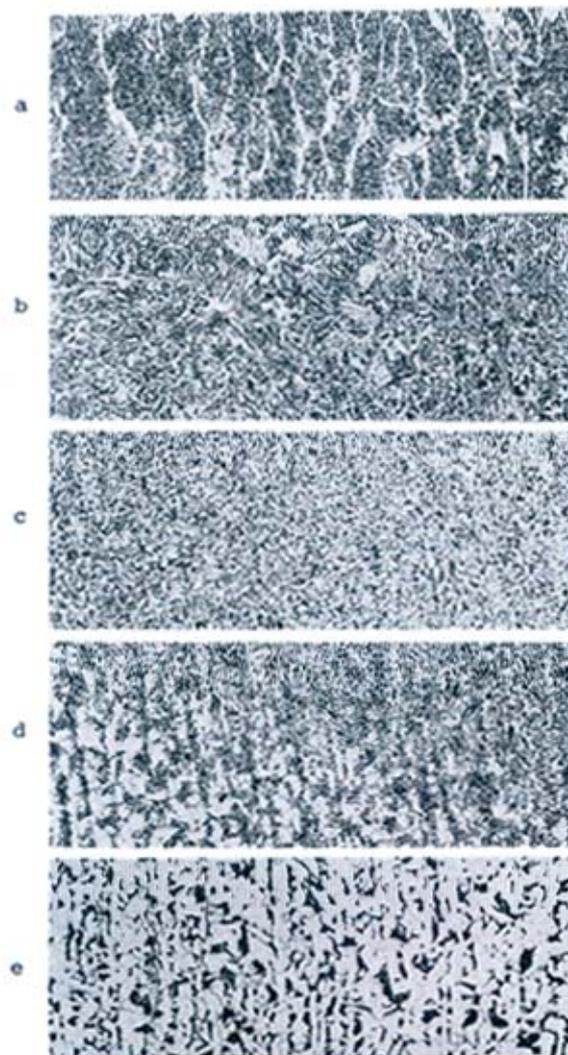


Figura 2.5 – Microestruturas mostrando as várias zonas da ZTA [14].

2.4.2.2 Principais Microconstituintes da ZTA

-Martensita (M)

Pode-se encontrar este constituinte em aços soldados de C-Mn. A martensita é dura, de pouca resistência e pode aumentar a susceptibilidade ao trincamento da ZTA por hidrogênio. É apresentado na Figura 2.6 martensita em meio a outros microconstituintes da ZTA [18].



Figura 2.6- Microestrutura da ZTA contendo regiões de martensita [18].

-Ferrita Com Martensita/ Carbetos/ Austenita Alinhados (MAC)

É a microestrutura predominante dos aços C-Mn. A ferrita pode ter um alinhamento ou não alinhamento, mas essa variação é provavelmente um efeito causado pelos elementos de liga. É apresentado na Figura 2.7 a ferrita com MAC em meio a outros microconstituintes da ZTA.

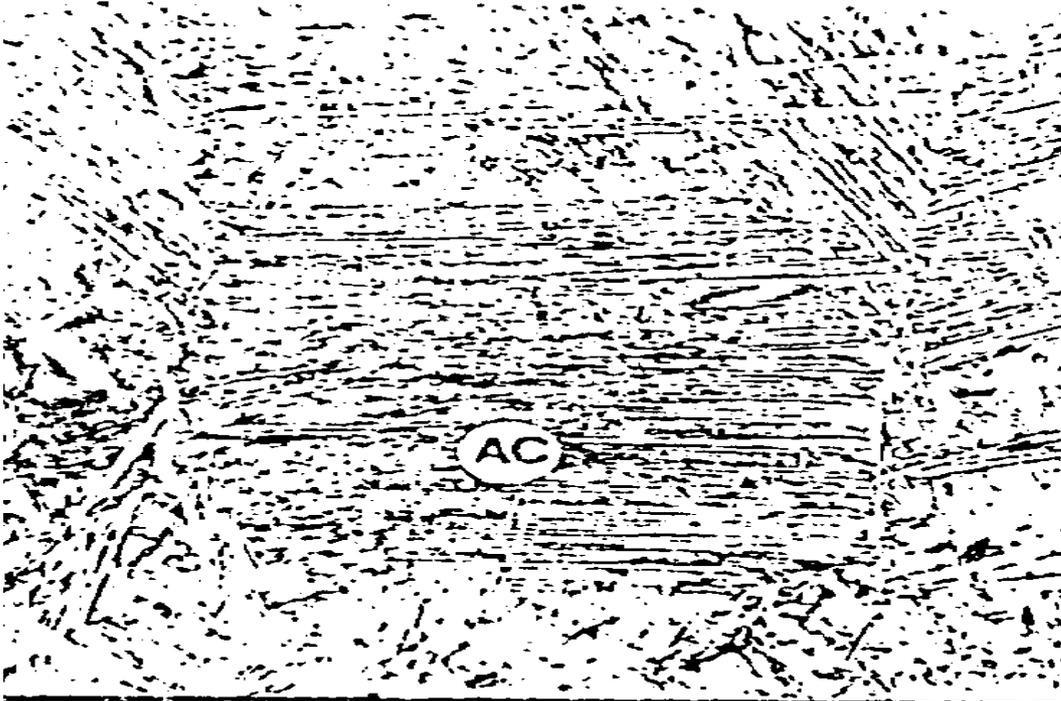


Figura 2.7- Microestrutura da ZTA contendo ferrita com carbetos alinhados[18].

-Ferrita Intragranular de Widmanstätten (WF)

Este tipo de ferrita forma-se à altas temperaturas de transformação e é favorecida pelo lento resfriamento associado com o alto aporte de calor. É apresentado na Figura 2.8 o constituinte WF apontado pela seta vermelha.

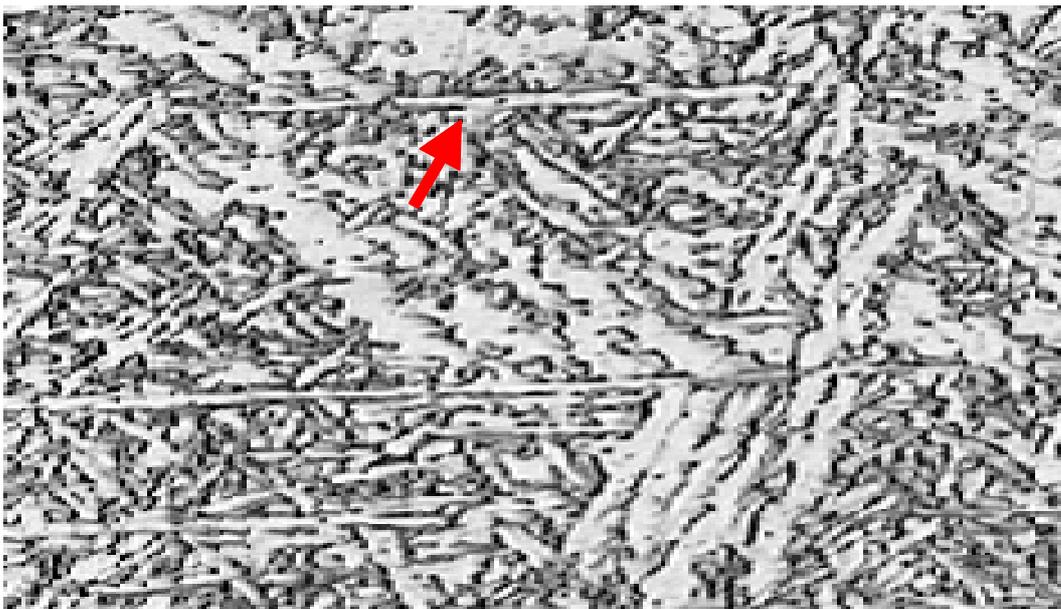


Figura 2.8- Microestrutura da ZTA contendo ferrita de Widmanstätten[18].

-Ferrita com segunda fase

Esta fase aparece em regiões longe dos contornos originais da austenita e é o resultado da reação de decomposição eutetóide. Tal microconstituente é assinalado pela seta vermelha na Figura 2.9.

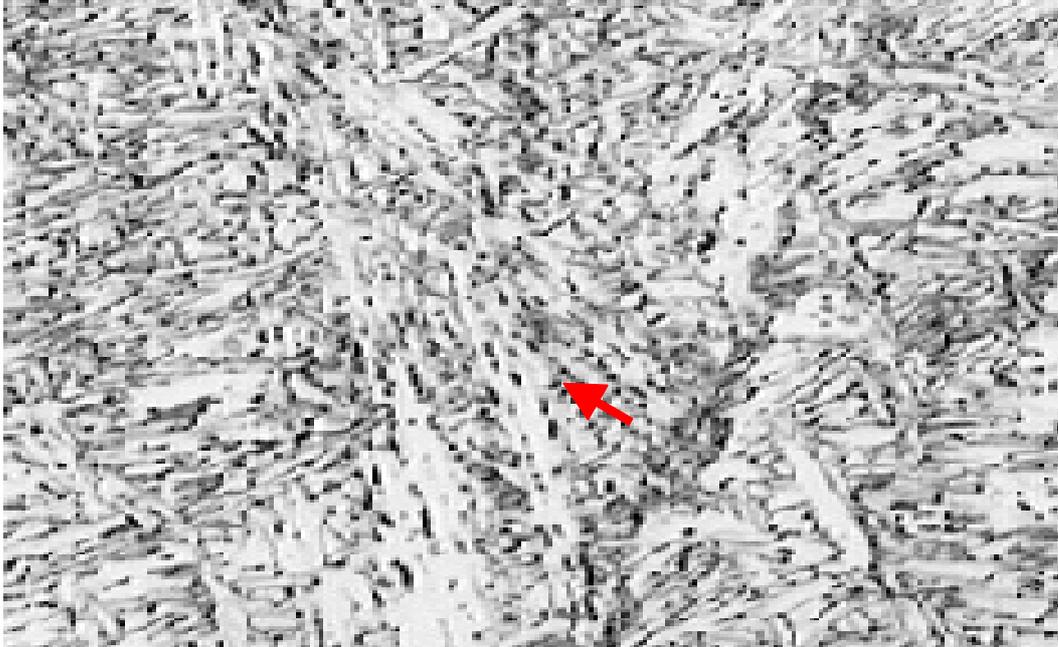


Figura 2.9 – Microestrutura da ZTA contendo ferrita com agregado de carbeto[18].

-Ferrita Primária (FP)

Há autores [18] que fazem uma subdivisão deste tipo de ferrita em :

- Ferrita associada aos contornos de grão da austenita;
- Ferrita poligonal intragranular

É apresentado na Figura 2.10 o microconstituente ferrita primária em meio a outros microconstituintes da ZTA.

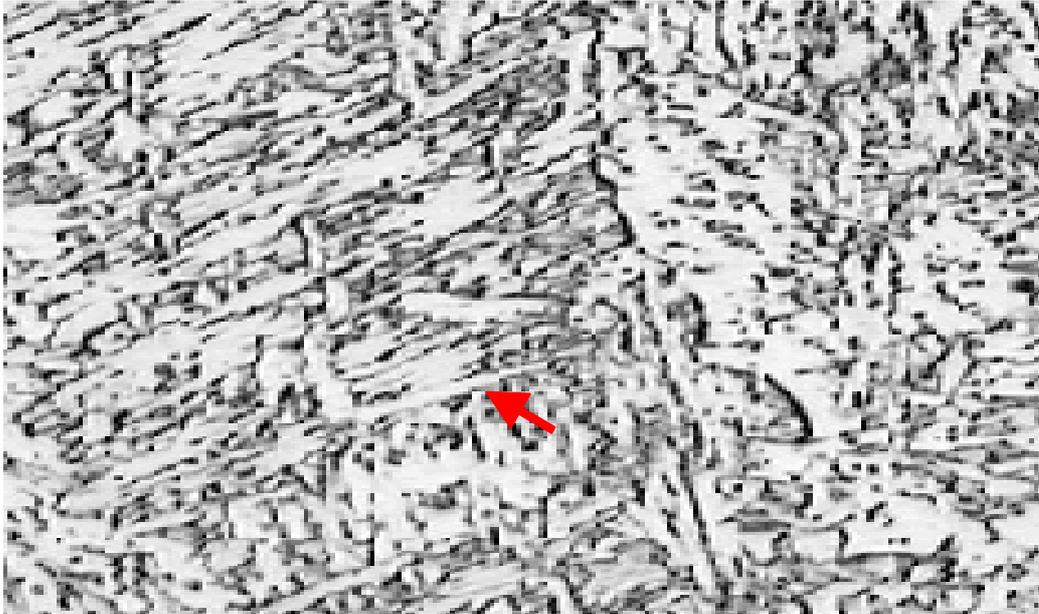


Figura 2.10 – Microestrutura da ZTA contendo ferrita primária [18].

-Ferrita Acicular (FA)

São pequenos grãos alinhados de ferrita encontrados no grão da austenita, sendo esta austenita não transformada ou primária. É apresentado na Figura 2.11 a FA em meios a outros micorsconstituintes da ZTA.

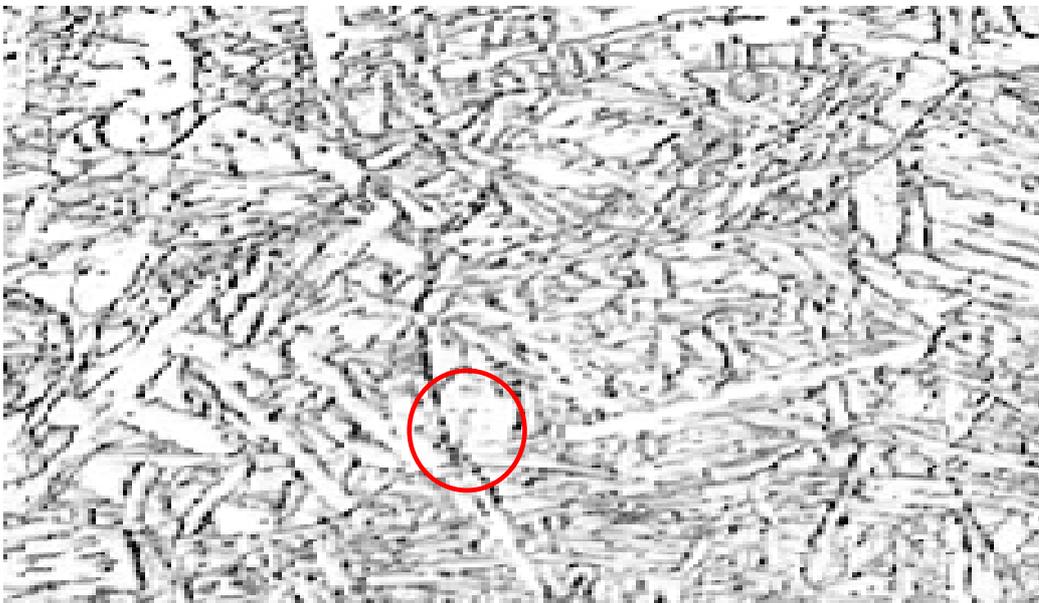


Figura 2.11 - Microestrutura da ZTA contendo ferrita acicular [18].

2.4.3 Metalurgia da Junta Soldada por Centelhamento

Embora a zona fundida seja expulsa durante o recalçamento, diferenças microestruturais básicas podem ser observadas entre a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de base em juntas obtidas por centelhamento. A energia associada ao processo de soldagem promove um gradiente térmico ao longo das seções longitudinais das peças, já que a temperatura varia entre a temperatura de fusão na interface de soldagem e a temperatura ambiente [8].

A ZTA em juntas obtidas por centelhamento, estende-se da linha de caldeamento até a região que tenha sido aquecida no mínimo a temperaturas significantes nos diagramas de transformação tempo-temperatura (Diagrama TTT) [8].

Em juntas do aço C-Mn que não tenham sido tratadas termicamente pós-soldagem, observa-se a presença de estruturas típicas de superaquecimento, como a estrutura de Widmanstätten [8,19] em regiões pertencentes a ZTA próximas a linha de caldeamento. Observa-se que esta estrutura tende a desaparecer à medida que a distância da linha de caldeamento aumenta. Associa-se então, o desaparecimento completo da ferrita de Widmanstätten e a redução do tamanho das colônias de perlita até seu valor próximo no metal de base, como o final da região de superaquecimento e da ZTA respectivamente [8].

A zona termicamente afetada nas juntas obtidas por centelhamento, é simétrica em relação a linha de caldeamento e pode ser eliminada através de tratamentos térmicos subsequentes a soldagem.

2.4.4 Os Efeitos de Elementos de Liga nas Ligas Fe-C

2.4.4.1 O Campo de Fase Austenítico e Ferrítico

Os elementos de liga podem influenciar no diagrama de equilíbrio de duas formas:

A) Expandindo o campo da austenita e aumentando a formação da austenita acima dos limites de composição. Estes elementos são chamados de estabilizadores da austenita.

B) Contraindo o campo da austenita e aumentando a formação de ferrita acima dos limites de composição. Estes elementos são chamados de estabilizadores de ferrita.

Na Figura 2.12 são mostrados os elementos formadores de ferrita e os formadores de austenita.

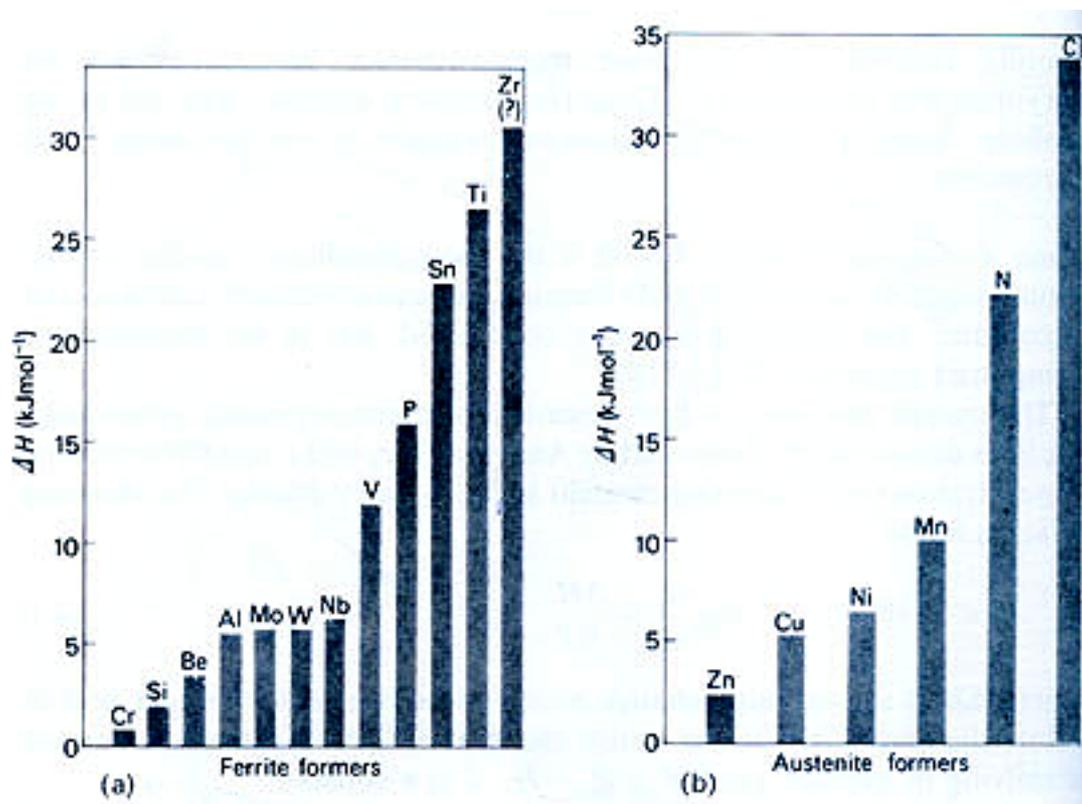


Figura 2.12 – Elementos formadores de ferrita e formadores de austenita[13].

A forma do diagrama depende do grau da estrutura eletrônica dos elementos de liga, o que reflete nas suas posições relativas na classificação periódica. Os elementos estão divididos em quatro classes [13]:

-Classe 1:

Abertura do campo austenítico. Neste grupo pertencem os elementos de liga nióbio, manganês, cobalto e metais inertes. O nióbio e manganês deprimem a transformação de fase da austenita para a ferrita em baixas temperaturas. É fácil obter a austenita metaestável pela têmpera da região austenítica para a temperatura ambiente.

-Classe 2:

Expansão do campo austenítico. O carbono e o nitrogênio são os mais importantes nesta classe. O cobre e o ouro têm similar influência.

-Classe 3:

Fecha o campo austenítico. Exs: silício, berílio e fósforo estão nesta categoria, pois encorajam a formação de ferrita. O titânio, vanádio, molibdênio e cromo são fortes formadores de carbetos.

-Classe 4:

Contração do campo austenítico. O boro é o mais significativo junto com os formadores de carbetos, como nióbio e zircônio.

2.4.4.2

A Distribuição dos Elementos de Liga em Aços

Para um teor de carbono fixo, conforme os elementos de liga são adicionados, o campo da austenita é expandido ou contraído dependendo do soluto[13].

Com um elemento como o silício, o campo da austenita é restringido e há um alargamento do campo ferrítico. Se o vanádio é adicionado, o campo austenítico é contraído e haverá carbetos de vanádio em equilíbrio com a ferrita. O níquel não forma carbetos e expande o campo austenítico.

Se somente aços onde há transformação da austenita para a ferrita e carbetos em resfriamento lento forem considerados, os elementos de liga podem ser divididos em três categorias:

- (1) Elementos que só entram na fase ferrítica (Ni,Cu,P,Si);
- (2) Elementos que formam carbetos estáveis e também entram na fase ferrítica (Mn, Cr, Mo, Va, Ti, W, Nb);
- (3) Elementos que entram só na fase de carbetos (N).

O manganês é adicionado ao aço para combinar com o enxofre existente, porém também funciona como um fortalecedor do aço, além disso, o manganês, o alumínio e o silício são desoxidantes. O alumínio é usado como refinador de grão e, portanto, também é um fortalecedor do aço.

Os aços ferrítico-perlítico são aços que dependem da presença de carbono e manganês. O conteúdo de carbono varia entre 0,05 e 1,0% e o de manganês

varia entre 0,25 e 1,7%. A variação do teor de carbono para um teor de manganês constante causa o aumento da tenacidade, o que se dá devido ao aumento de perlita na estrutura. A situação mais complexa é quando o teor do manganês varia mantendo o teor de carbono constante. O manganês faz com que a composição eutetóide ocorra com baixos teores de carbono e então há o aumento da proporção de perlita na microestrutura. O manganês é um efetivo fortalecedor da solução sólida e tem influência no refinamento de grão.

O refinamento do tamanho de grão pode ser alcançado pela pouca adição de elementos de liga como alumínio, vanádio, titânio, nióbio em concentrações que não excedem 0,1%. O alumínio forma uma dispersão estável da partícula, enquanto que o vanádio, nióbio, titânio formam carbeto estáveis, o que reduz o grão da austenita, permitindo grãos de ferrita mais finos.

2.5 Microestrutura de Bandeamento

2.5 Introdução

A natureza dendrítica do processo de solidificação nos aços leva a uma microsegregação de impurezas e elementos de liga nestes aços. Uma das maiores conseqüências desta microsegregação é a formação de estruturas de bandeamento [20].

O bandeamento é um fenômeno conhecido há um longo tempo, mas ainda é um problema. Manifesta-se através da formação de alinhamento paralelamente à direção de laminação, em seções polidas e atacadas. Este fenômeno de bandeamento ocorre durante uma deformação causada pela laminação, levando às regiões da estrutura em ficarem ricas ou pobres em determinados elementos de liga.

Em geral o bandeamento provém também da falta de homogeneidade que se dá quando ocorre o resfriamento do aço. O primeiro sólido formado tem uma composição diferente do último, o que provoca segregações nas zonas do lingote mais ricas em elementos de liga e essas segregações influenciam na natureza das fases que se formam em transformações posteriores e com isso a concentração de carbono não é homogênea.

A correlação entre a segregação e a formação da estrutura de bandas pode ser explicada considerando os fenômenos de difusão e a capacidade de cada elemento para difundir-se [21].

O bandeamento ocorre mais freqüentemente no meio da chapa, devido à segregação preferencial dos elementos como manganês e devido às baixas taxas de resfriamento nessas regiões. As regiões que tem baixa concentração de elementos que estabilizem a austenita, como manganês, no resfriamento lento, transforma primeiro para a ferrita e então há rejeição de carbono para as regiões austeníticas mais ricas em manganês. O resfriamento concentra maior teor de carbono nessas regiões ricas em manganês até serem transformadas na estrutura de perlita eutetóide [22].

Se a diferença de temperatura de transformação de austenita para ferrita nas diferentes regiões é dado por ΔT e a taxa de resfriamento é T , então o tempo para a difusão do carbono é $\Delta T/T$. Se o espaço entre bandas é d e o coeficiente de difusão do carbono é D_c , a condição para desenvolver as bandas de ferrita-perlita é dada por:

$$T < (D_c \Delta T) / d^2 \quad (3)$$

Se o material segregado é resfriado mais rápido que este valor, o bandeamento não vai se desenvolver, mas existe na fabricação dos aços uma potencialidade para o bandeamento permanecer e pode ser desenvolvido em um tratamento térmico subsequente [13].

Em 1971, Grange [13] reportou que um curto tempo de recozimento nos aços carbono de baixa liga (10 minutos à 1350°C), que possuem segregações, remove a tendência ao bandeamento no resfriamento lento. Este tratamento térmico não remove a segregação interdendrítica que causa o bandeamento e isso é confirmado pelo retorno do bandeamento durante a deformação à quente.

2.5.2 Bandeamento Ferrita/ Perlita dos Aços Hipoeutetóides

Com a clara separação das fases em bandas de ferrita e perlita, as propriedades locais serão afetadas, o que afetará as macropropriedades, como resistência mecânica e tenacidade ao impacto.

No mecanismo de bandeamento de ferrita/perlita, os coeficientes de difusão, D_x , dos vários elementos de liga em aço, são bem menores do que o valor do coeficiente de difusão D_C do carbono no aço[13]. Algumas características importantes sobre essa forma de bandeamento serão listadas abaixo:

- A microestrutura bandada aparece após o resfriamento da região austenítica, mas somente se a taxa for lenta. A taxa de resfriamento crítica requerida para eliminar o bandeamento é uma função do aço e do seu processamento. Os valores variam de 1200 °C/h até $1,8 \times 10^4$ °C/h.
- Se a amplitude da microsegregação é reduzida pela difusão durante a alta temperatura de tratamento térmico, o bandeamento pode ser eliminado, mas não permanentemente.
- A formação do bandeamento pode ser eliminada pelo crescimento dos grãos da austenita.

Pesquisadores atribuíram a perda do bandeamento de ferrita/perlita à alta taxa de resfriamento para redução da distância da interface austenita/ ferrita [13].

É mostrado na Figura 2.13 uma estrutura típica com bandeamento de perlita e ferrita nos aços hipoeutetóides.



Figura 2.13- Amostra de aço com 0,21C e 0,85 Mn com bandeamento ferrita/perlita [22].

2.5.3 Possibilidade de Ação sobre o Bandejamento

Pode-se deduzir que existem diferentes possibilidades de atuação sobre a estrutura de bandejamento. São elas:

- atuar sobre o aço de partida, ou seja, obter um método para conseguir reduzir o grau de segregação do aço;
- atuar durante o processo de deformação à quente, ou seja, variar a temperatura de forjamento e o grau de redução pois quanto maior a redução, menor a distância entre as bandas e mais homogeneizado está o material;
- atuar com um tratamento térmico posterior, ou seja, realizar um recozimento com difusão à temperatura relativamente elevada (maior que 1000°C) para eliminar as causas de bandejamento na estrutura e segregações produzidas durante a solidificação do aço ou realizar um recozimento isotérmico para tentar suprimir ou atenuar a formação de bandejamento sem eliminar as causas do efeito[21].

2.5.4 Tratamento Térmico de Recozimento

O tratamento térmico de recozimento é feito com o objetivo de homogeneizar a microestrutura do material, ou seja, eliminar as segregações de elementos de liga em determinadas regiões preferenciais da microestrutura.

A microestrutura que possui uma estrutura bandeada é consequência de microsegregações de elementos de liga, que pode ser manganês entre outros elementos, e essa microsegregação é produzida pelo crescimento dendrítico do aço durante a sua solidificação.

O recozimento, se feito de forma correta, ou seja, utilizando temperatura e tempo adequados, consegue eliminar o bandejamento da microestrutura, devido a melhora na distribuição dos elementos de liga pelo material.