

1º SEMINÁRIO BAIANO DE TECNOLOGIAS DE FABRICAÇÃO 2010

O papel dos processos de fabricação no suporte tecnológico ao crescimento industrial

10 a 12 de maio de 2010 – Salvador – Bahia – Brasil

May 10 – 12, 2010 - Salvador – Bahia – Brazil



Influência dos Elementos de Liga nos Aços Carbono, Baixa e Média Liga - Uma Revisão

Roosevelt de Carvalho Regis, roosevelt@cimatec.fieb.org.br¹

Sergio Rodrigues Barra, barra@cimatec.fieb.org.br²

¹ e ² Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Avenida Orlando Gomes, 1845 – Piatã – Salvador, Bahia, Brasil

Resumo: As propriedades mecânicas dos aços (resistência a tração, dureza e outras) podem ser melhoradas com a adição de uma pequena quantidade de um ou mais elementos químicos ao aço carbono comum. Este trabalho reúne informações referentes às influências dos principais elementos de liga nos aços de baixa e média liga, enfatizando as características mecânicas de maior relevância concedida ao novo metal ligado. Os elementos de liga aqui abordados são: o carbono, enxofre, manganês, cromo, níquel, molibdênio, silício, fósforo, alumínio, cobre, nióbio, tungstênio, vanádio, nitrogênio e titânio.

Palavras-chave: Aço Carbono Comum, Aços Baixa e Média Liga e Características Mecânicas dos aços.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o diagrama ferro-carbono, todas as ligas de Fe-C (Fe-Fe₃C) que contenham menos do que de 2.11% de carbono, são classificadas com aço, e a partir deste ponto todos com maior teor de carbono são denominados de ferro fundido.

Quando são adicionados elementos de liga para obtenção de determinadas propriedades, o que difere aço do ferro fundido continua sendo a fronteira de 2.11% de teor de carbono, independentemente dos teores dos demais elementos.

Os aços são os materiais mais complexos e amplamente utilizados na engenharia, isso se deve ao fato de que existe abundância de ferro na crosta terrestre, de sua elevada temperatura de fusão, a qual gira em torno de 1534 °C, e de uma enorme variedade de propriedades mecânicas; esta última vem sendo fonte constante de estudo, destacando a adição intencional de determinados elementos de liga nos aços com objetivo de formar uma nova liga metálica, ou aço ligado com melhores características na resistência mecânica, ductibilidade, dureza, usinabilidade e outras em relação ao aço carbono comum (Chiaverine, 2005; Costa e Silva, 2008; AMS Internacional, 1990; Colpeart Humbertus, 1974).

Propõem-se a introdução de outros elementos de liga nos aços carbono comum, quando se deseja um ou mais dos seguintes efeitos (Costa e Silva, 2008; AMS Internacionall, 1990).

- ✓ Aumentar a dureza e a resistência mecânica do aço;
- ✓ Diminuir o peso (conseqüência do aumento da resistência mecânica, proporcionando a diminuição nas dimensões da peça, viga ou outro componente mecânico);
- ✓ Conferir resistência à corrosão;
- ✓ Aumentar a resistência à temperatura;
- ✓ Aumentar a resistência ao desgaste;
- ✓ Aumentar a capacidade de corte;
- ✓ Melhora as propriedades elétricas e magnéticas;
- ✓ Prevê tratamento térmico (temperabilidade);
- ✓ Prevê mudanças de fases.

As propriedades de maior relevância que freqüentemente se buscam melhorar em um aço são a ductibilidade, a dureza, resistência mecânica e a resistência à corrosão, adicionalmente, existem outras mais que podem ser melhoradas como a fadiga, fluência, estrição, plasticidade, soldabilidade e temperabilidade (Callister, 2002; AMS Internacional, 1990).

Assim, este trabalho revisa os tipos de elementos de liga e seus efeitos no aço carbono comum, baixa e média liga.

2. NOMENCLATURA DOS AÇOS

Segundo Totten (2006) e Chiaverini (2005), os aços são classificados por diferentes sistemas e a escolha do sistema adotado dependerá do que será considerado em relação ao critério de classificação; por facilitar o entendimento abaixo são listados alguns pontos relevantes para a definição dos sistemas de classificação.

- ✓ Composição química (aço carbono, baixa e média liga e outras);
- ✓ Métodos de manufatura (forno elétrico e outros);
- ✓ Aplicabilidade (estrutural ferramentas e outras);
- ✓ Método de acabamento (laminação a quente e a frio, fundição e outras);
- ✓ Forma do produto (barra, chapa, tubos e outras);
- ✓ Técnicas de oxidação empregadas (aço acaalmados, semi-acalmados e outros) ;
- ✓ Microestrutura (ferrítico, perlítico e outros) ;
- ✓ Nível de resistência requerido, conforme especificado na norma (ASTM);
- ✓ Tratamento térmico(resfriamento rápido, tempera e outras);
- ✓ Descrição da qualidade e classificação (qualidade comercial).

Considerando-se o foco deste estudo (efeitos dos elementos de liga), podem-se classificar os aços de três maneiras diferentes:

- ✓ De acordo com a composição química (aço carbono ou aço liga);
- ✓ De acordo com a estrutura (perlíticos, martensíticos, austeníticos);
- ✓ De acordo com a aplicação (aços para fundição, ferramentas, estrutura, trilhos, tubos, entre outros).

Embora se tenha diferentes sistemas de classificação dos aços, o sistema mais largamente utilizado e que, inclusive, fundamenta o sistema adotado no Brasil, é aquele que considera a composição química (Totten, 2006; Chiaverini, 2005).

Fundamentando-se neste fato e para efeito deste estudo, será abordado a seguir, mais detalhadamente, o sistema que considera como critério de classificação a composição química.

O sistema que considera a classificação dos aços em função da composição química se subdivide nos seguintes grupos:

- ✓ Aço carbono comum;
- ✓ Aço de baixa liga;
- ✓ Aço de média liga;
- ✓ Aço de alta liga.

2.1. Aço carbono

Em conformidade com a norma NBR 6006 da ABNT, são denominados de aço carbono os aços cujos teores de silício (Si) e manganês (Mn) não ultrapassem os 0,6% e 1,65%, respectivamente, e possuam ainda teor máximo de 0,1% Al, teor mínimo de 0,0005% B, teor máximo de 0,3 % Cu e ou teor máximo de 0,35% Pb; mesmo quando adicionado na composição outros elementos de liga para melhorar a característica de usinabilidade do aço, este ainda será denominado como aço carbono, segundo (Chiaverini (2005), Totten (2006).

Por sua vez os aços carbonos se subdividem ainda em (Chiaverini, 2005; Costa e Silva 2008; AMS Internacional volume I, 1990):

- i. Baixo Carbono: $C < 0,30\%$, soma das impurezas $< 2\%$

Características:

- Limite de resistência: 440 MPa;
- Boa tenacidade, conformabilidade e soldabilidade;
- Baixa temperabilidade;

Aplicações:

- Pontes, edifícios, navios, vagões, caldeiras, tubos em geral, estruturas mecânicas, etc.

- ii. Médio Carbono: $0,30\% < C < 0,50\%$, soma das impurezas $< 2\%$

Características:

- Limite de resistência: 440 a 590 MPa;
- Média conformabilidade e soldabilidade;
- Média temperalidade.

- iii. Aço de Alto Carbono: $C > 0,50\%$, soma das impurezas $< 2\%$

Características:

- Limite de resistência: 590 a 780 MPa;
- Baixa conformabilidade e soldabilidade;
- Alta resistência ao desgaste.

Aplicações:

- Peças metálicas, parafusos especiais, implementos agrícolas, trilhos e rodas ferroviárias, entre outras.

2.2. Aço baixa liga

A ABNT denomina como aços ligados aqueles que possuam outros elementos de liga, que não tenham a função de melhorar a usinabilidade do aço, possuam teores superiores a 0,6% Si, 1,65% Mn, 0,1% Al, respectivamente (Chiaverini, 2005; Costa e Silva, 2008).

Os aços que possuem um teor de elementos de liga (soma de todos os elementos de liga) entre 1,5% e 5,0% são considerados como aços de baixa liga. Devido a baixa quantidade de teores de elementos de liga, estes não são capazes de programar profundas alterações nas estruturas dos aços resultantes, bem como na natureza dos tratamentos térmicos a que devam ser submetidos (AMS Internacional volume I, 1990).

2.3. Aços de média liga

Os aços de média liga possuem um teor de elementos de liga maior que 5%, e inferior á 10% (Chiaverini, 2005; AMS Internacional volume I, 1990).

2.4. Aços de alta liga

Os aços de alta liga possuem um teor de elementos de liga superior á 10%. Devido a este fato, os elementos de liga são capazes de induzir profundas e, em muitos dos casos, essenciais alterações nas estruturas do aço resultante, exigindo na maioria dos processos tratamentos térmicos e a adoção de técnicas e cuidados especiais (Chiaverini, 2005).

Na figura 1 é apresentado o sistema de classificação na forma de fluxograma do sistema comentado nos itens 2.1 a 2.4 e do sistema de classificação que considera a estrutura

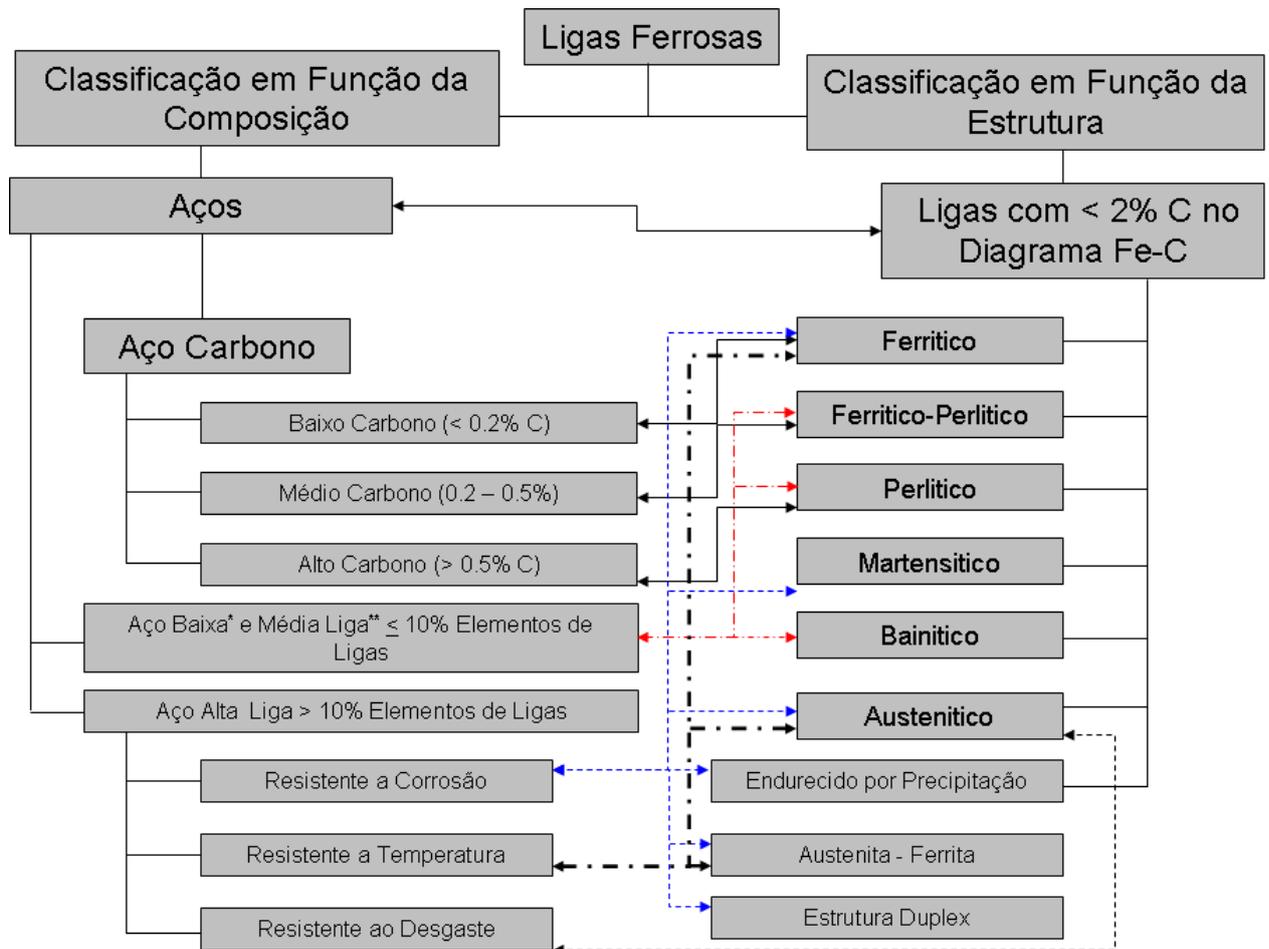


Figura 01 Classificação dos aços segundo os critérios de composição química e estrutura (Totten, 2006).

A classificação dos aços adotada pela ABNT (NBR NM87) e muito parecida com a utilizada pela AISI (American Iron and Institute) e pela SAE (Society of Automotive Engineers) SAE J404; neste tipo de classificação os aços são divididos em grupos principais e, dentro destes grupos, em famílias de características semelhantes, conforme exemplo abaixo (Totten, 2006).

Por esse enfoque um aço com uma especificação 4120 significa que os dois primeiros algarismos traduzem que este aço faz parte da família 41, a qual possui Cr 0,50%, 0,80% ou 0,95% e Mo 0,12%, 0,20% ou 0,30%, conforme pode ser visto na Tabela 01 abaixo, e ainda os dois últimos números informam a porcentagem de carbono 0,20% C, (Totten, 2006); além destes números podem ser encontradas letras como o “H” que caracteriza temperabilidade assegurada, e o “B” que indica a presença de boro.

Tabela 01 – Classificação segundo critério que considera a composição química SAE (Costa e Silva, 2008)

CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A COMPOSIÇÃO QUIMICO	
Classificação	Composição química
10xx	Aços-carbono;
11xx	Aços-carbono com muito enxofre e pouco fósforo;
12xx	Aços-carbono com muito enxofre e muito fósforo;
13xx	Manganês (1,75%);
23xx	Níquel (3,5%);
25xx	Níquel (5%);
31xx	Níquel (1,5%), cromo (0,6%);
33xx	Níquel (3,5%), cromo (1,5%);
40xx	Molibdênio (0,2 ou 0,25%);
41xx	Cromo (0,5; 0,8 ou 0,95%), molibdênio (0,12; 0,2 ou 0,3%);
43xx	Níquel (1,83%), cromo (0,5 ou 0,8%), molibdênio (0,25%);
44xx	Molibdênio (0,53%);
46xx	Níquel (0,85 ou 1,83%), molibdênio (0,2 ou 0,25%);
47xx	Níquel (1,05%), cromo (0,45%), molibdênio (0,25%);
48xx	Níquel (3,50%), molibdênio (0,25%);
50xx	Cromo (0,28% ou 0,40%);
51xx	Cromo (0,80, 0,90, 0,95, 1,00 ou 1,05%);
61xx	Cromo (0,80 ou 0,95%), vanádio (0,10 ou 0,15%);
86xx	Níquel (0,55%), cromo (0,50 ou 0,65%), molibdênio (0,20%);
87xx	Níquel (0,55%), cromo (0,50%), molibdênio (0,25%);
92xx	Manganês (0,85%), silício (2,00%);
93xx	Níquel (3,25%), cromo (1,20%), molibdênio (0,12%)
94xx	Manganês (1,00%), níquel (0,45%), cromo (0,40%), molibdênio (0,12%);
97xx	Níquel (0,55%), cromo (0,17%), molibdênio (0,20%);
98xx	Níquel (1,00%), cromo (0,80%), molibdênio (0,25%).

3. EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA

De uma maneira geral, a aplicação dos elementos de liga, com exceção do Al e Co, nos aços tendem a deslocar a curva de transformação dos diagramas de transformação por resfriamento contínuo (TRC ou CCT) e os do diagramas de tempo x temperatura x transformação (TTT), para a direita e para baixo, conforme demonstrado na figura 02 (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990; Ilia Novikov, 1994).

Um fato que difere o carbono dos demais elementos de liga, é que ele tende a deslocar a curva de transformação para a direita e para baixo, enquanto seu teor no aço não ultrapassar a casa dos 0.8% “ponto eutetoide” (composição eutetoide), onde este atinge seu máximo de deslocamento para a direita, quando o percentual de carbono no aço ultrapassa a barreira dos 0.8% a curva tende a se deslocar para a esquerda e para baixo (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990; Ilia Novikov, 1994).

No processo de soldagem do aço carbono em determinados casos não é desejável a formação de martensita como fase resultante do processo, pois a martensita não revenida é muito dura, é frágil, além disso, as tensões internas introduzidas no processo de soldagem possuem um efeito de fragilização;

entretanto a desejável martensita revenida, possui uma dureza e resistência próxima a da martensita não revenida, com uma ductilidade e uma tenacidade substancialmente aprimoradas (Calister 2002).

Dependendo do elemento de liga e de seu percentual no aço, a linha de transformação correspondente a Martensita final de transformação (Mf) dos diagramas de transformação, podem se deslocar para valores negativos de temperatura, e se o resfriamento deste aço for realizado a temperatura ambiente, não irá cruzar a linha final de transformação Mf, obtendo-se assim no aço as fases martensítica não revenida e a austenita retida (Totten,2006).

Na figura 04 e apresentado a influencia do percentual dos elementos de liga em relação à linha de transformação inicial da martensita (Mi), no gráfico se observa que, exceto Al e Co, quanto maior o percentual dos elementos de liga mais baixo fica a temperatura da linha de transformação da martensita inicial, assim sendo, em alguns casos a temperatura da linha final de transformação da martensita (MF) fica negativa(Totten, 2006).

Na figura 03 foram copilados os dados do comportamento da dureza de ferro puro em função do percentual da quantidade de cada elemento de liga abaixo descrito:

Predominância do p, Si, Mn, Ni, Mo, V, W e Cr.

Quando se adiciona um percentual maior de qualquer um dos elementos de liga, descrito na figura, ao ferro puro, o efeito desta adição é caracterizado pela elevação da dureza da nova liga metálica. Observa-se ainda na figura 03 que a ação do P, Si e Mn é muito mais eficaz do que o Cr no que diz respeito ao mecanismo de endurecimento da liga metálica (Chiaverini, 2005; AMS Internacional, 1990).

Para facilitar a apresentação das informações relevantes com relação aos elementos de liga aqui abordados, montou-se duas planilhas, com o copilado das principais características dos elementos de liga e seus efeitos no aço. Este copilado serve para uma pesquisa rápida, sendo abordado de forma isolada cada elemento mais detalhadamente ao longo do trabalho.

São apresentadas na tabela 02 a solubilidade dos elementos químicos na matriz do ferro (α e γ), além de seus arranjos cristalínicos e a solução sólida formada, e na tabela 03 seus principais efeitos no aço.

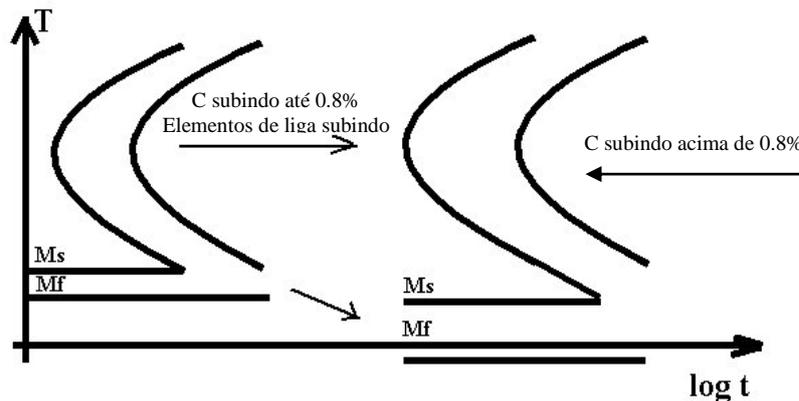


Figura 02 - Efeito do teor de elemento de liga sobre a posição da curva CCT/TTT (aços 0,8% de C).

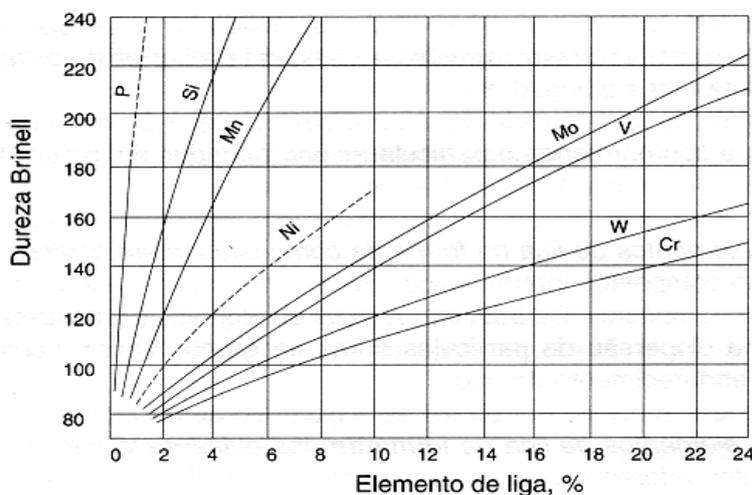


Figura 03 Efeito do endurecimento causado pela adição de elemento de liga no ferro puro (Chiaverini, 2005)

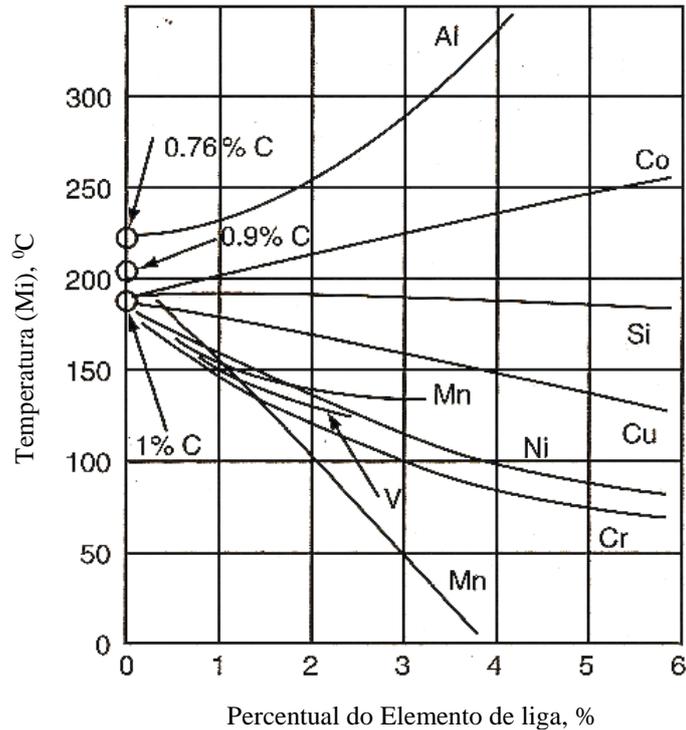


Figura 04 Efeito dos elementos de liga no aço com 1% de carbono no ponto de martensita inicial (Totten, 2006)

Tabela 02 Apresenta as características de arranjo cristalino, solubilidade em ferro α e ferro γ , e tipo de solução sólida formada na matriz, referente aos efeitos dos elementos de liga nos aços (Chiaverini, 2005; Marcio de Almeida Ramos, 1989; AMS Internacional, 1990).

EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS					
ELEMENTO	MAXIMA SOLUBILIDADE À TEMPERATURAS ELEVADAS		ARRANJO CRISTALINO	SOLUÇÃO SOLIDA	
	FERRO α	FERRO γ		SUBSTITUTIVA	INTERSTÍCIAL
S	0.02%	0.05%	COMPLEXA	X	
C	0.03%	2.1%	GRAFITE		X
Mn	3.5%	100%	FCC	X	
Cr	100%	12.5%	BCC	X	
Ni	6%	100%	FCC	X	
Mo	3.5%	1.7%	BCC	X	
Si	11%	1.7%	DIAMANTE	X	
P	2.4%	0.3%	CÚBICO	X	
Al	29%	0.6%	FCC	X	
Cu	2.1%	12%	FCC	X	
Nb	1.2%	1.6%	BCC	X	
W	35%	4.7%	BCC	X	
V	100%	1.3%	BCC	X	
N	0.1%	2.8%			X
Ti	8%	0.7%	HD	X	

Tabela 03 Apresenta os principais efeitos dos elementos de liga nos aços.

EFEITOS DOS ELEMENTOS DE LIGA NOS AÇOS	
ELEMENTO	PRINCIPAIS EFEITOS
S	Melhora a usinabilidade, pode causar fragilidade a quente e fratura por decoesão lamelar.
C	Basicamente aumenta a dureza do aço.
Mn	Combate a fragilidade a quente oriunda do S, aumenta a resistência mecânica, aumenta a forjabilidade, melhora a temperabilidade, aumenta a resistência ao choque, aumenta o limite elástico, diminui a ductilidade, probabilidade de trincar durante a têmpera
Cr	Aumenta a resistência a corrosão, a altas temperaturas, a tração, ao desgaste e melhora a temperabilidade
Ni	Aumenta a resistência mecânica, a tenacidade, facilita o tratamento térmico.
Mo	Tende a elevar a dureza e a resistência a altas temperaturas, induz endurecimento secundário durante o revenimento de aços temperados, com teores de 0,15% a 0,30% tende a diminuir a susceptibilidade à fragilização nos aços revenidos.
Si	É um dos principais desoxidante, aumenta a resistividade elétrica e a permeabilidade magnética do aço, melhora a resistência a fluência, proporciona um pior acabamento superficial em aços de baixo carbono.
P	Com teor inferior a 0,10% melhora a usinabilidade do aço, em aços de baixo carbono aumenta dureza, resistência ao desgaste e corrosão
Al	É considerado como um dos melhores desoxidante, reduz a tendência ao envelhecimento induzido por deformação (Strain-aging)
Cu	Com teores entre 0,2% e 1,5% aumenta a temperabilidade e a resistência a corrosão, teores superiores ao citado tendem a reduzir a ductilidade, não proporciona um bom acabamento superficial, aumenta a resistência a fissuração induzida pela pressão do hidrogênio.
Nb	Tendem a aumentar a resistência mecânica. em aços estruturais de alta resistência e baixa liga.
W	Aumenta consideravelmente a dureza e a resistência a tração em altas temperaturas, além de formar carbonetos bastante duros que são utilizados em aços ferramentas.
V	Tende a diminuir o tamanho do grão, eleva a resistência ao desgaste em altas temperaturas, atua como desoxidante, tende a retardar o tratamento térmico, promove endurecimento secundário, aumenta a resistência a tração e ao impacto.
N	Em teor superior a 0,001% promove endurecimento por precipitação, pode aumentar a dureza superficial e pode melhorar a resistência a corrosão localizada.
Ti	Melhora a tenacidade através da redução dos grãos, eleva a resistência a corrosão intergranular, melhora as propriedades mecânicas em altas temperaturas.

3.1. Efeito do Carbono

Ironicamente, o carbono detém as formas alotrópicas mais antagônicas da natureza, sendo uma delas o grafite, uma das substâncias mais frágil e barata da natureza, e a outra forma alotrópica o diamante, uma das mais duras e cara da natureza; além de possuir uma enorme facilidade de se combinar quimicamente com outros átomos diminutos.

O carbono quando combinado com o ferro puro forma o aço carbono comum ou o ferro fundido, ambos considerados ligas metálicas de carbono e ferro, diferenciando-se em seus percentuais de carbono e características mecânicas. (Chiaverini, 2005; Marcio de Almeida Ramos, 1989; AMS Internacional, 1990).

Na figura 05 são apresentadas algumas curvas mostrando o aumento da dureza causado pela presença de cromo e de manganês no ferro puro e no aço 0,1% de carbono (Chiaverini, 2005).

Observa-se que tanto o aço como o ferro possuem uma proporcionalidade no que se refere à curva de endurecimento, porém fica claro que com a adição de 0,1% de carbono as faixas de durezas ficam superiores para os mesmos teores de elementos de liga, ou seja, o carbono contribui para o endurecimento do metal.

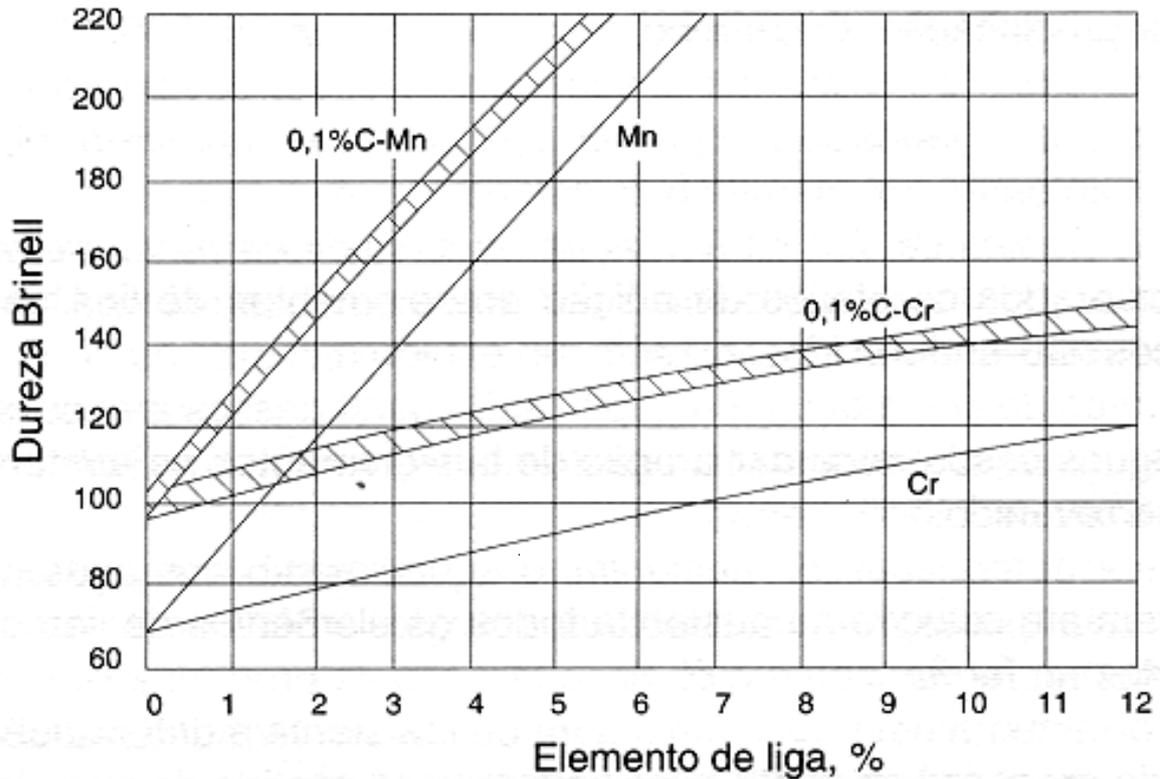


Figura 05 Aumento da dureza causado pela adição de elemento de liga em ferro puro e em aço 0,1% C(Costa e Silva, 2008).

NA figura 06 é mostrada, de forma aproximada, as variações da dureza, tensões de tração máxima e de escoamento com o teor de carbono do aço.

Nota-se que com o aumento do percentual do carbono a dureza se eleva gradativamente, e que as tensões de tração e escoamento também aumentam nos aços hipoeutetóides, mas tendem a estabilizar-se nos hipereutetóides.

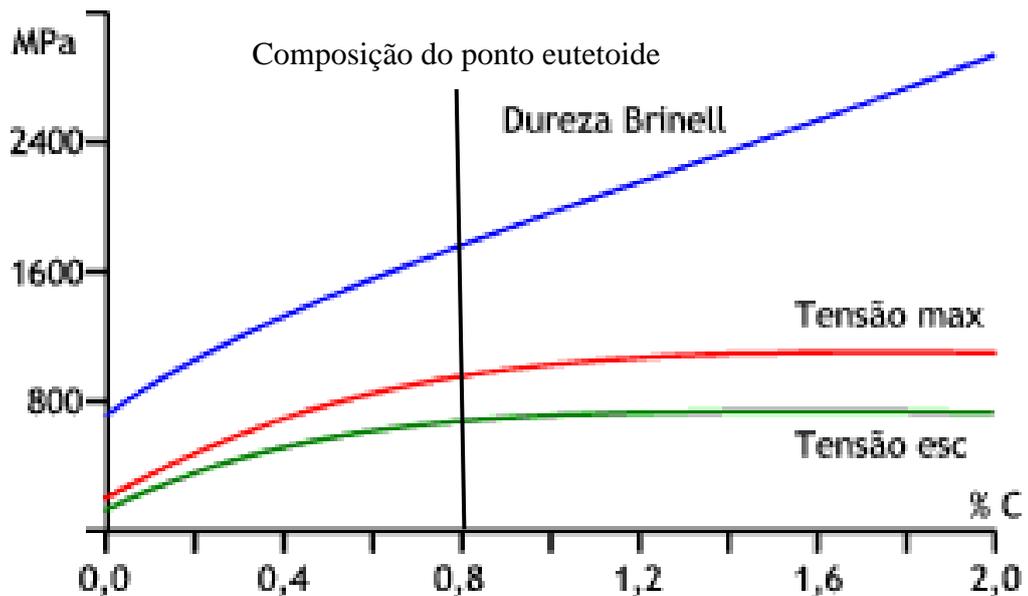


Figura 06 Curvas de dureza, tensões de tração máxima e de escoamento em relação ao teor de carbono (MSPC- ferros e aços).

Na figura 07 são apresentadas as variações aproximadas do alongamento e resistência ao impacto em função do teor de carbono. Considerando o observado no gráfico pode-se concluir que para um percentual maior de carbono acarretará uma maior fragilidade e menor ductilidade no aço.

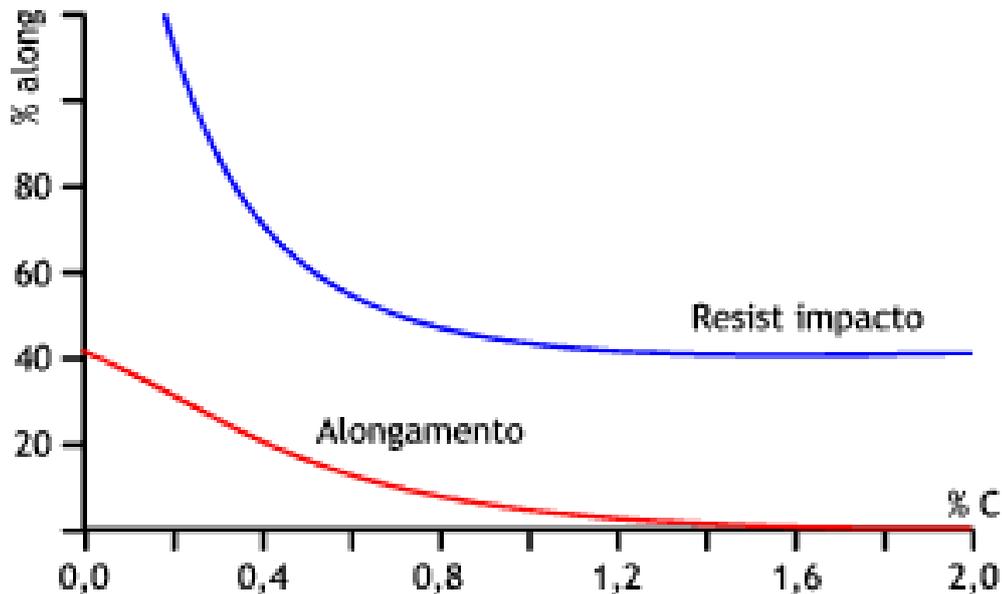


Figura 07 Curvas de variações do alongamento e resistência ao impacto em função do percentual de carbono (MSPC- ferros e aços).

3.2. Efeitos do Enxofre

Se for encontrado enxofre no aço em percentuais que o caracteriza como elemento de liga, provavelmente este irá provocar a chamada fragilização a quente, pois o enxofre forma sulfeto de ferro FeS, provocando a diminuição do seu ponto fusão para a ordem de 1000 °C. Neste caso, quando se deseja uma conformação a quente adequada deve-se adicionar manganês à liga, pois o enxofre tem maior afinidade com o Mn do que com o Fe, formando preferencialmente o MnS, sulfeto de manganês, o qual possui um ponto de fusão de 1600 °C, solucionando-se a fragilidade a quente, além de se formar em partículas muito pequenas, facilitando a deformação e o modelamento do material no sentido da conformação (Gorni,1997; Ramos Almeida, 1989; Bain, 1945; AMS Internacional, 1990).

Como o enxofre tem uma grande afinidade com o manganês, havendo a presença de Mn, este tende a formar o sulfeto de manganês MnS, que por possuir uma temperatura de solidificação superior a do aço, solidifica-se antes do que o aço e, conseqüentemente, é direcionado para uma linha preferencialmente no centro da peça, tornando esta região frágil, por ser repleta de impurezas. Quando tracionada por qualquer solicitação residual, a exemplo da tensão residual de soldagem, pode abrir trincas na peça, causando a chamada fratura por decoesão lamelar.

Para se evitar este problema utiliza-se aços dessulfurados para um máximo 0,015% de S (Gorni,1997; Ramos Almeida, 1989; Bain, 1945; AMS Internacional, 1990; Colpaert, 1974; Branffit, B.L.).

[Segundo Colpaert Hubertus, o teor máximo de enxofre tolerado nos aços é de 0,05%, acima deste percentual passa a ser considerado elemento de liga e é nocivo ao aço, Entretanto, como dito anteriormente, como impureza este se combina com o manganês e com o ferro, formando sulfureto de manganês e sulfureto de ferro, dando ao aço uma melhor características de usinabilidade; para maiores informações ler (AMS Internacional, 1990; Colpaert, 1974; Branffit, B.L.).

3.3. Efeitos do Manganês

O manganês é desoxidante e reage com o enxofre, prevenindo a fissuração a quente (Ramos, Almeida,1989; AMS Internacional, 1990; Colpaert,1974); este mesmo elemento diminui a temperatura de transição no ensaio Charpy e também aumenta a resistência mecânica.

Os percentuais comumente utilizados nos aços variam entre 0,40% e 1,60% (Ramos, Almeida,1989), porém pode-se encontrar aços especiais com 10% a 15% de manganês (AMS Internacional, 1990; Colpaert,1974)

Em função da maior afinidade do enxofre pelo manganês em relação ao ferro, este elemento tende a aumentar a forjabilidade do aço, uma vez que há predominância na formação do MnS em substituição ao FeS.

Melhora também a temperabilidade, resistência ao choque e o limite elástico. Entretanto causa uma diminuição na ductilidade, e sabe-se ainda que aços ricos em manganês têm maior tendência para trincar durante a têmpera. Para maiores esclarecimentos ver referências (AMS Internacional volume I, 1990; Colpaert, 1974; Totten, 2006).

3.4. Efeitos do Cromo

O cromo se apresenta na natureza com uma cor cinza, muito parecida com a do aço, é um metal duro, frágil e bastante resistente à corrosão.

Alem de melhorar a resistência a corrosão dos aços, aços com teor a partir de 12% são considerados aços inoxidáveis e são bastante resistentes a água e a vários ácidos. A adição de cromo no aço propicia o aumento da resistência a tração, além de melhorar a temperabilidade e aumentar representativamente a resistência à altas temperaturas e desgastes (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).

3.5. Efeitos do Níquel

O níquel se caracteriza na natureza por se um ótimo condutor de eletricidade e calor, apresentando uma coloração branca prateada, é um material dútil, maleável e resistente a corrosão.

Quando utilizado como elemento de liga, aumenta a resistência da ferrita, porque o níquel não forma carbonetos, permanecendo solúvel na fase ferrítica e assim elevando sua resistência e tenacidade (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).

Outra característica relevante do elemento níquel no aço é de que facilita o tratamento térmico, visto que diminui a temperatura de crítica de resfriamento

Quando combinado com o cromo, o níquel produz ligas de aço com maior temperabilidade, maior resistência ao impacto e a fadiga (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990; Costa e Silva, 2008).

3.6. Efeitos do Molibdênio

O molibidênio puro é apresentado com uma cor branca prateada, sendo um dos materiais que possui o ponto de fusão mais alto entre todos os elementos puros.

Quando utilizado como elemento de liga, confere ao aço um aumento representativo em sua dureza e resistência a altas temperaturas (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).

Geralmente é acrescentado nos aços de construção nas quantidades normais de 0,10 a 1% (AMS Internacional, 1990).

O molibidênio quando está em solução sólida na austenita antes da têmpera, causa um retardo nas taxas de transformação durante o processo de tempera, isto se considerado em relação ao aço carbono (AMS Internacional, 1990; Totten, 2006)

O molibidênio pode ainda induzir endurecimento secundário durante o revenimento de aços temperados, e melhora a resistência a fluência em altas temperaturas nos aços de baixa liga (AMS Internacional, 1990; Totten, 2006; Costa e Silva, 2008).

Aços ligados que contenham de 0,15 a 0,30% de molibdênio tendem a diminuir a susceptibilidade à fragilização nos aços revenidos, Para maiores informações ler o artigo "Discussion of Temper embrittlement and other forms of thermal embrittlement" no AMS Internacional, 1990, properties and selection: Irons, steels, and high-performance alloys.

3.7. Efeitos do Silício

Quando encontrado na forma cristalina é muito duro e não possui uma boa solubilidade na água, com um brilho metálico e uma coloração grisácea. Sendo basicamente inerte e resistente à ação da maioria dos ácidos; reage com os halogênios e álcalis. O silício transmite mais de 95% dos comprimentos de onda das radiações infravermelhas.

O silício como elemento de liga no aço aumenta a resistividade elétrica do mesmo, e devido a este fato, aços com teores de silício até 1,9% são geralmente utilizados em núcleos de geradores e motores elétricos e, com teores até 5%, em núcleos de transformadores (Ramos, Almeida, 1989); Outra característica do silício como elemento de liga no aço é que este elemento tem a propriedade de aumentar a permeabilidade magnética do aço. (Ramos, Almeida, 1989; Totten, 2006)

O silício é comumente encontrado nos aços estruturais em teores de 0,15% a 0,40%; é um dos principais desoxidantes utilizado no fabrico de aço, pois apresenta, em sua maioria, maior tamanho de grão,

aumentando à resistência a fluência, o que melhora o desempenho dos aços para serviços em alta temperatura. (Costa e Silva, 2008).

Em aços de baixo carbono, geralmente, a presença do silício proporciona um pior acabamento superficial e torna-se mais acentuado em aços resulfurizados (AMS Internacional I, 1990)

O silício é menos eficaz do que o manganês no que se refere ao aumento da resistência e dureza dos aços laminados (AMS Internacional, 1990)

3.8. Efeitos do Fósforo

Embora o fósforo apresente algumas vantagens, seus aspectos prejudiciais predominam, sendo ele geralmente considerado como uma impureza (Bain, 1945).

Em aços de baixo carbono seus efeitos nocivos são minimizados e concede ao aço um aumento da dureza, resistência ao desgaste, corrosão e conseqüentemente melhora a resistência a tração (Costa e Silva, 2008).

Embora não tenha a tendência de formar carbonetos, desenvolve-se na ferrita, endurecendo-a e aumentando o tamanho do seu grão, concedendo ao material uma característica de fragilidade a frio (Chiaverini, 2005; Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).; este efeito é tão maior quanto maior for o teor de carbono , para maiores informações ler (Costa e Silva, 2008).

Aços com teor de inferior a 0.10% C, o fósforo favorece ao aumento da usinabilidade, e se acentua quando o percentual do enxofre é elevado (Chiaverini, 2005; Totten, 2006).

Em aços ligados o fósforo é admitido em percentuais de 0,025 % a 0,04 %, no máximo (Costa e Silva, 2008).

3.9. Efeitos do Alumínio

É um metal leve, macio, porém resistente a corrosão, devido à fina camada de oxidação que se forma rapidamente quando exposto ao ar, tem ainda uma excelente durabilidade.

O alumínio não é tóxico e é o segundo metal mais maleável (o primeiro é o ouro), e o sexto mais dúctil.

Por ser um bom condutor de calor, é muito utilizado em painéis de cozinha e dissipadores de calor (Costa e Silva, 2008).

O alumínio é considerado como sendo um dos melhores desoxidantes no fabrico dos aços (Chiaverini, 2005; Totten, 2006; AMS Internacional, 1990; Costa e Silva, 2008), pois reage com o nitrogênio, formando nitretos, os quais contribuem para restringir o crescimento do grão, e assim sendo, os aços desoxidados por alumínio podem apresentar granulação fina e diminuição da temperatura de transição.

Outro fato a considerar é que a remoção do nitrogênio da solução sólida favorece a redução da tendência ao envelhecimento induzido por deformação (Strain-aging) (AMS Internacional, 1990).

3.10. Efeitos do Cobre

Quando utilizado com teores entre 0,2% a 1,5%] tem a tendência de aumentar a temperabilidade e a resistência a corrosão, preferencialmente a atmosférica, contudo não se devem utilizar valores muito superiores a estes, pois começa a produzir endurecimento por precipitação, que tendem a reduzir a ductilidade a quente (Costa e Silva, 2008; Totten, 2006)

Outra característica relevante do cobre como elemento de liga é que ele aumenta a resistência do aço a fissuração, induzida pela pressão de hidrogênio (totten 2006).

Uma desvantagem do cobre no aço liga é que ele não proporciona um bom acabamento superficial (AMS Internacional, 1990).

3.11. Efeitos do Nióbio

Com teores da ordem de 0,03%, este elemento é adicionado aos aços estruturais de alta resistência e baixa liga (HSLA – High strenght low alloy) com o intuito de aumentar a resistência mecânica, através do refino do grão (Chiaverini, 2005; Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).Com este percentual pode-se implementar um aumento de 20 a 30% de resistência mecânica em aços carbono comum (Costa e Silva, 2008).

O nióbio também é utilizado nos aços inoxidáveis com o intuito de remover o carbono, que pode formar carboneto de cromo, prejudicial em certos tipos de aços inoxidáveis (Chiaverini, 2005; Totten, 2006; AMS Internacional, 1990; Souza,1989).

3.12. Efeitos do Tungstênio

Se utilizado como elemento de liga, tende a aumentar consideravelmente a dureza do aço, aumenta a resistência a tração em altas temperaturas, e tende a formar carbonetos bastante duros, que são desejáveis em aços para ferramentas (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990; Souza, 1989).

3.13. Efeitos do Vanádio

Se adicionado como elemento de liga, é geralmente encontrado com teores que variam de 0,15% a 0,20%, conferindo ao aço uma diminuição do tamanho do grão, aumentando a resistência ao desgaste em altas temperaturas, propiciando a formação de carbonetos duros, que quando utilizados em aços ferramentas aumenta a capacidade de corte (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990; Hans Berns; Souza, 1989).

Vanádio atua também como desoxidante, formando carbonetos; tem um efeito benéfico sobre as propriedades mecânicas dos aços submetidos a tratamento térmico. Especialmente, na presença de outros elementos de liga, tende a retardar o tratamento térmico e na faixa de 500-600 ° C pode provocar o endurecimento secundário (Totten, 2006).

Vanádio aumenta a resistência à tração dos aços ao carbono, a adição de pequenas quantidades de vanádio pode aumentar significativamente a resistência dos aços, sendo ainda um dos principais contribuintes para o reforço da precipitação em aços microligados (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990; Hans Berns).

O vanádio retarda o crescimento de grãos no interior dos aços, mesmo após longa exposição a temperaturas elevadas e ajuda a controlar o grão, proporcionando um refino do mesmo além de aumentar a resistência ao impacto (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).

3.14. Efeitos do Nitrogênio

O nitrogênio é um elemento em muitos dos casos considerado nocivo aos aços por causar fragilidade no mesmo (Souza, 1989).

Segundo Chiaverini (2005), se encontrado nos aços de baixo carbono tende a produzir o fenômeno de endurecimento por precipitação,

O nitrogênio pode combinar-se com muitos elementos para formar nitretos e, portanto, é aplicado ao aço para aumentar a sua dureza superficial (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).

A incorporação de nitrogênio em aços austeníticos cromo-níquel estabiliza a austenita e aumenta a resistência mecânica (Totten, 2006; Chiaverini, 2005; Souza, 1989).

Nos aços carbono tem uma atuação na "Fluência" (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).

O Nitrogênio aumenta a resistência à corrosão localizada, especialmente na combinação com molibdênio (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).

3.15. Efeitos do Titânio

Uma das principais utilizações do titânio nos aços é como desoxidante, pois é o elemento com maior tendência a formação de carboneto em altas temperaturas (Souza, 1989).

O Titânio é utilizado para retardar o crescimento de grãos e, assim, melhorar a tenacidade (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).

Também é usado para realizar melhorias nas características da inclusão, sendo o Sulfureto de Titânio a causa das inclusões globulares em vez de alongadas (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).

Quando adicionado ao aço, tende a aumentar a resistência à corrosão intergranular, mas também melhora as propriedades mecânicas em altas temperaturas (Totten, 2006).

O titânio é usado para formar os compostos intermetálicos, que são utilizados para aumentar a resistência mecânica (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).

A principal utilização do titânio é a de estabilizar carbono através da formação de carboneto de titânio, que é acrescentado ao aço de baixo carbono para evitar bolhas durante vitreo enameling

O Carboneto de titânio é usado com o carboneto de tungstênio no fabrico de ferramentas de metal duro (Totten, 2006; AMS Internacional, 1990).

REFERÊNCIAS

AMS International. AMS HANDBOOK, VOLUME I, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. Tenth edition - 1990.

Antonio Augusto Gorni , Celso Gomes Calvalcanti - Efeito dos elementos de liga sobre a resistência à deformação a quente de aços ao carbono e microligados – Anais do 2o Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgico e de Materiais, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Outubro de 1997, São Paulo.

Bramfitt, B.L. Metallographer's Guide – Practices and Procedures for Irons and Steels,

Chiaverini, Vicente; Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos- 7.ed.ampl e ver.-São Paulo-2005, 599 folhas;

Costa e Silva, André Luiz V. da; Mei, Paulo Roberto. Aços e Ligas Especiais, 2o edição, 2008 - 646 folhas.

Dr. Edgar C. Bain. Functions of the Alloying Elements in Steel, U.S Steel Corporation, Pittsburgh, Pa. Fourth printing, July, 1945

George E. Totten – Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies – editor p.cm. – 2006 – segunda edição - 833 folhas

Golpaert, Humbertus. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos - Segunda Edição- 1974.

Hans Berns, Werner Theisen – Ferrous Materials, Steel and Cast Iron– ed Springer

Marcio de Almeida Ramos – Metalurgia – PETROBRAS (SEDES/DITED/SEIND) – Edição 1989, Serviço de Desenvolvimento de Recursos Humanos, Divisão de Tecnologia Educacional, Setor de Introdução e Didática.

MSPC- ferros e aços- em 13/02/2008, <http://www.mspc.eng.br/ciemat/aco210.shtml>

Mok Chek Min, Effect of Alloying Elements on Steels– CM MOK cmmok128@yahoo.com

Novikov, Iliia – Teoria dos tratamentos térmicos dos aços – trad. De Joel Regueira Teodoro – Rio de Janeiro – Editora UFRJ, 1994

Paxton & vierling – Established 1885 – Effect of Alloying Elements - em 12/02/2008 - www.pvsteel.com/docs/tsb-125.pdf

Souza, Sergio Augusto de – composição química dos aços – São Paulo: Edgard Blucher, 1989

William D. Calister, Jr; Ciência e Engenharia de Materiais, Uma introdução – Quinta Edição – 2002 - 589 Folhas