

# ANÁLISE DO GRAU DE CONTAMINAÇÃO COM CARBONO DO AÇO INOXIDÁVEL ASTM A743 CA6MN EM RAZÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES EM CONJUNTO COM AÇO CARBONO

Sérgio Luís Marquezi\*  
João Henrique Bagetti\*\*  
Monica Prior\*\*\*

## Resumo

Os aços inoxidáveis martensíticos são utilizados em grande escala como matéria-prima na construção de componentes, no setor hidrelétrico, sendo exigidas duas características aliadas: boa resistência mecânica e à corrosão. Os tratamentos térmicos empregados no aço ASTM A743 CA6MN têm grande influência na obtenção dessas duas propriedades. O presente trabalho tem por objetivo estudar o grau de contaminação com o carbono, do aço inoxidável martensítico ASTM A743 CA6-MN, quando se realiza o tratamento térmico de alívio de tensões com o aço carbono. Os corpos de prova do aço ASTM A743 CA6MN foram tratados nas seguintes condições: afastados do corpo de aço carbono, encostados no corpo de aço carbono e presos ao corpo de aço carbono; todos os tratamentos foram realizados a uma temperatura de aquecimento de 620 °C, e todos os resultados obtidos são comparados para amostras sem alívio de tensões. Para a avaliação dos corpos de prova, ocorreu a realização de espectrometria de emissão óptica, verificando a composição química de cada amostra, testes de dureza na escala Rokwell com carga de 150 Kg, para a análise das propriedades mecânicas, e ensaios metalográficos para a análise da estrutura cristalina. Os resultados indicam que se há contaminação, esta não é significativa para afetar a funcionalidade do equipamento, sendo, portanto, indicado o tratamento térmico subcrítico com aço carbono, o que vem a otimizar a utilização do forno com aço inox martensítico ASTM A743 CA6MN em razão do tratamento térmico com o aço carbono. Com isso, pode-se realizar o tratamento dos aços juntamente, aliando a minimização de custos com o aumento de produtividade.

Palavras-chave: Contaminação. ASTM A743 CA6MN. Alívio de tensões.

## 1 INTRODUÇÃO

Em razão do aumento de solicitação de energia elétrica a cada dia, o setor das indústrias hidrelétricas vem crescendo com essa necessidade. Para atender à solicitação dos componentes da indústria hidrelétrica, fazem-se necessário a utilização de aços com facilidade de fabricação e propriedades mecânicas elevadas; o aço inox martensítico fundido ASTM A743 CA6MN se encaixa consideravelmente nessas especificações.

\* sergio.marquezi@unoesc.edu.br

\*\* joao.bagetti@unoesc.edu.br

\*\*\* monicaprior@hotmail

Para o aprimoramento de suas propriedades, o aço ASTM A743 CA6MN deve passar por tratamento térmico de alívio de tensões; assim, para a minimização de perda de tempo e aumento de produtividade, os tratamentos no aço inox são realizados com diferentes aços. Desse modo, buscou-se desenvolver estudos que permitissem avaliar se durante o tratamento alívio de tensões ocorre contaminação do aço inox martensítico ASTM A743 CA6MN, quando tratado com aços carbono, sendo, então, verificada a possibilidade de realizar tratamento subcrítico em conjunto do aço inoxidável com outros tipos de aços.

De tal forma, espera-se obter resultados que contribuam para a viabilidade técnico-econômica da utilização deste.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

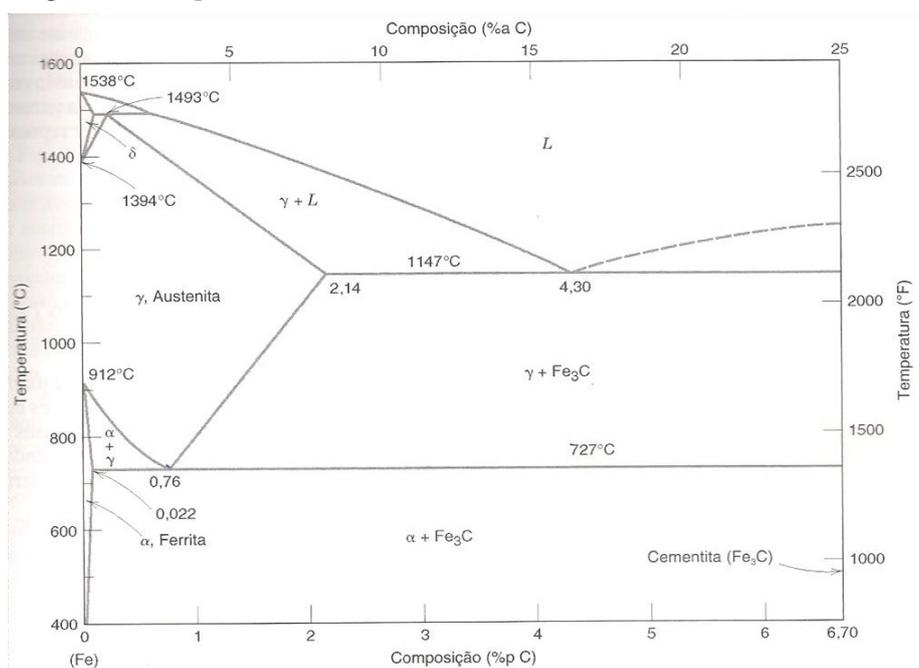
### 2.1 AÇOS

O aço basicamente é uma liga de ferro, carbono e elementos de liga. Para Chiaverini (2008, p. 22), “Aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes do processo de fabricação.”

O diagrama ferro-carbono ajuda a compreender a microestrutura dos aços. Nele, pode-se perceber que ligas que possuem mais do que 2,11% de carbono em peso são considerados ferros fundidos. Pode-se perceber que existem três estruturas principais (Diagrama 1), que são: ferrita, austenita e ferro delta (CALLISTER JÚNIOR, 2002, p. 190).

A ferrita também é conhecida como ferro  $\alpha$ , possuindo uma estrutura cristalina CCC, uma vez que está aquecida a temperaturas acima da linha crítica, ou 727 °C, passará por uma transformação polimórfica, sendo conhecida por austenita ou ferro  $\gamma$ , tendo como estrutura cristalina a CFC.

Diagrama 1 – Equilíbrio Fe-C



Fonte: Callister Júnior (2002, p. 189).

Porém, existe outro composto intermediário na liga ferro-carbono. Callister Júnior (2002, p. 189) ressalta que até na concentração de 6,7% de carbono em peso existe o carbeto de ferro, de composição química  $Fe_3C$ , chamado cementita, sendo considerado um componente da liga.

No Diagrama 1, ao traçar-se uma linha perpendicular ao eixo da concentração de carbono, em 0,76% em peso, temos a divisão dos aços, hipoeutetoide e hipereutetoide, e exatamente na concentração de 0,76% em peso, está situado o ponto eutetoide.

Ao se aquecer um aço carbono acima de 727 °C para o ponto eutetoide e resfriá-lo lentamente, ocorrerá a formação de outra microestrutura conhecida por perlita.

Para as ligas hipereutetoides, destaca que estão dentro da faixa de 0,76% a 2,14% de carbono em peso, as ligas hipoeutetoide são compostas na faixa de 0,022% a 0,76% de carbono em peso (CALLISTER JÚNIOR, 2002).

A partir de um resfriamento rápido da austenita, ocorre o surgimento de uma fase meta-estável nos aços, esta nova fase é denominada martensita (SILVA; MEI, 2006, p. 57).

Callister Júnior (2002, p. 210) acrescenta que “[...] a martensita é uma estrutura monofásica que não se encontra em equilíbrio, resultante de uma transformação sem difusão da austenita. Ela pode ser considerada como sendo um produto da transformação que compete com a perlita e a bainita.”

### 2.1.1 Aços-carbono

Um aço carbono é um aço sem adição proposital de outros elementos, contendo apenas o carbono e os quatro elementos residuais sempre encontrados nos aços e que permanecem em sua composição durante o processo de fabricação, ou seja, manganês, silício, fósforo e enxofre (SOUZA, 1989, p. 2).

Os aços apresentam uma subdivisão em dois grupos: aço-carbono e aço-liga. O primeiro ainda pode ser dividido em outros três grupos, sendo eles: aços de baixo teor de carbono, com carbono inferior a 0,2%; aços de médio carbono, com carbono entre 0,2% e 0,5% e; os aços de alto teor de carbono, com carbono acima de 0,5% (CHIAVERINI, 2008a, p. 22).

## 2.2 AÇOS INOXIDÁVEIS

Conforme Silva e Mei (2006, p. 407), “Aços com teores de cromo superiores a 12% têm grande resistência à oxidação e são comumente designados como aços inoxidáveis.”

Para uma melhor compreensão dos aços inoxidáveis, pode-se dividi-los em subgrupos. Chiaverini (2008, p. 394) afirma que estes aços podem ser classificados de maneira mais simples, com base na microestrutura que apresentam à temperatura ambiente. São divididos em três grupos: os Aços Inoxidáveis Martensíticos – ou endurecíveis; Aços Inoxidáveis Ferríticos – não endurecíveis; Aços Inoxidáveis Austeníticos – também não endurecíveis.

De acordo com a literatura estudada, os aços inoxidáveis martensíticos contêm de 12 a 17% em peso de Cr, 1 a 0,5% em peso de C e elementos de liga (Ni, Mo, Mn, P, S e outros), e podem atingir diversos graus de dureza pela variação das condições de tratamento térmico.

Os aços inoxidáveis ferríticos contêm de 16 a 30% de Cr em peso, baixo teor de carbono e adições de certos elementos de liga como manganês, molibdênio, silício, titânio, nióbio e fósforo e livre de níquel (SOUZA, 1989, p. 87).

Os aços inoxidáveis austenísticos apresentam boa resistência à corrosão associada a excelentes propriedades mecânicas. Uma grande melhoria em muitas propriedades é obtida com a introdução de Ni como elemento de liga; isso leva à mudança na microestrutura, havendo a mudança de ligas ferríticas para ligas austeníticas (SOUZA, 1989, p. 97).

### 2.2.1 Aço inoxidável martensítico

Os aços inoxidáveis martensíticos são análogos das ligas de ferro-carbono, os quais são austenitizados, endurecidos por têmpera e revenidos para alcançar as propriedades desejadas. Os aços inoxidáveis martensíticos possuem em sua constituição um nível de cromo que varia de 11,5% a 18%.

Têmpera em aços inoxidáveis requer temperaturas de certa forma elevadas; para a austenitização e subsequentemente a transformação em martensita, os aços necessitam que os carbonetos sejam totalmente dissolvidos, obtendo, assim, uma austenita uniforme garantindo maior tenacidade (SILVA; MEI, 2006, p. 412).

Para explicar melhor o efeito do alívio de tensões, considerando que possui a mesma faixa de temperatura do revenimento, segundo Silva e Mei (2006, p. 413):

Observa-se que há três faixas de revenimento importantes: até cerca de 400 °C a dureza cai pouco com revenimento, podendo, em alguns graus ocorrer endurecimento secundário, um pouco acima desta temperatura. Revenimento nesta faixa de temperatura (450-500 °C) pode ocasionar perda de tenacidade e deve ser evitado. Acima de 500 °C há uma rápida redução de dureza e na resistência mecânica, acompanhada por aumento da ductilidade e tenacidade. Esta faixa de temperatura é freqüentemente empregada para obtenção da melhor combinação de propriedades para fins estruturais.

Podem-se considerar três classes dentro dos aços inoxidáveis martensíticos: baixo carbono, também chamado tipo “turbina”; médio carbono, também chamado tipo “cutelaria”; e alto carbono, também chamado tipo “resistência ao desgaste” (CHIAVERINI, 2008b, p. 397).

### 2.2.2 Aço Inoxidável Martensítico ASTM A743 CA6MN

Em meados do século passado foi desenvolvida uma categoria especial de aços inoxidáveis martensíticos, chamados de macios, tendendo melhorar a limitada soldabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos convencionais, mediante a redução do teor de carbono e a adição adequada de níquel. A Tabela 1 apresenta a composição química normalizada deste aço.

Tabela 1 – Composição química normatizada do aço ASTM A743 CA6MN

Material	Composição (%)							
	C (máx.)	Mn (máx.)	Si (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Ni	Cr	Mo
ASTM A743 CA6MN	0,06	1	1	0,04	0,03	3,5- 4,5	11,5- 14	0,4-1

Fonte: adaptado da norma ASTM A743/A743M-06 (2006).

Um dos principais fatores que motivou o desenvolvimento foi a necessidade de se diminuir os defeitos causados durante a solidificação do material, como: segregações, formação de trincas a quente e a frio como também microrrechupes. Estes defeitos faziam com que peças fundidas alterassem suas propriedades. Na Tabela 2 podem-se observar algumas características relevantes deste aço.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas normalizadas do aço ASTM A743 CA6MN.

Propriedades Mecânicas à temperatura ambiente		
Propriedade	Valores típicos	Mínimos requeridos
Limite de resistência à tração (MPa)	830	755
Limite de escoamento (0,2%, MPa)	690	550
Alongamento, em 2in (%)	24	15
Redução de área (%)	60	35
Dureza Brinell (HB)	268	285 ( máx.)

Fonte: adaptado de Gouveia (2008).

### 2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Para Silva e Mei (2006, p. 83), as “Operações de aquecimento e resfriamento controlados, que visam a afetar as características dos aços e ligas especiais, são denominados tratamentos térmicos.”

Os tratamentos térmicos variam desde temperaturas negativas, ou seja, abaixo de 0 °C a 1280 °C para a austenitização de aços rápidos. Várias taxas de resfriamento podem ser empregadas para obter as características ideais do metal, utilizando fornos para que a temperatura sempre permaneça controlada (SILVA; MEI, 2006, p. 83).

Em relação aos principais objetivos dos tratamentos térmicos, Chiaverini (2008, p. 82) apresenta:

- a) remoção de tensões (oriundas de esfriamento, trabalho mecânico ou outra causa);
- b) aumento ou diminuição da dureza;
- c) aumento da resistência mecânica;
- d) melhora da ductilidade;
- e) melhora da usinabilidade;
- f) melhora da resistência ao desgaste;
- g) melhora das propriedades de corte;
- h) melhora da resistência à corrosão;
- i) melhora da resistência ao calor;
- j) modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

Em relação aos fatores de influência de um tratamento térmico, Chiaverni (2008, p. 82) destaca que o aquecimento, o tempo de permanência à temperatura de aquecimento, o resfriamento e a atmosfera do forno são os principais.

O aquecimento tem como parâmetros básicos de controle a velocidade de aquecimento e a temperatura de aquecimento. Já o tempo de permanência à temperatura de aquecimento consiste no tempo em que o material permanecerá na temperatura de patamar; tempos muito elevados podem ocasionar a descarbonetação. Nessa fase ocorre a dissolução dos carbonetos de ferro. O resfriamento detém a parte mais importante, pois nele consolidará a microestrutura resultante do aço, com isso as propriedades. A atmosfera do forno pode causar uma descarbonetação do material em razão da reação do carbono com o oxigênio e a oxidação do ferro. Caso isso ocorra, a superfície do material terá uma superfície mais mole (CHIAVERINI, 2008b, p. 83-84).

### 2.3.1 Alívio de tensões

Silva e Mei (2006, p. 83) adotam como principais tratamentos térmicos o recozimento, a normalização, a têmpera e, por fim, o revenimento, em que este é um tratamento térmico associado aos três primeiros, como um tratamento térmico complementar aos três primeiros, que envolvem a transformação de fase a partir da austenita.

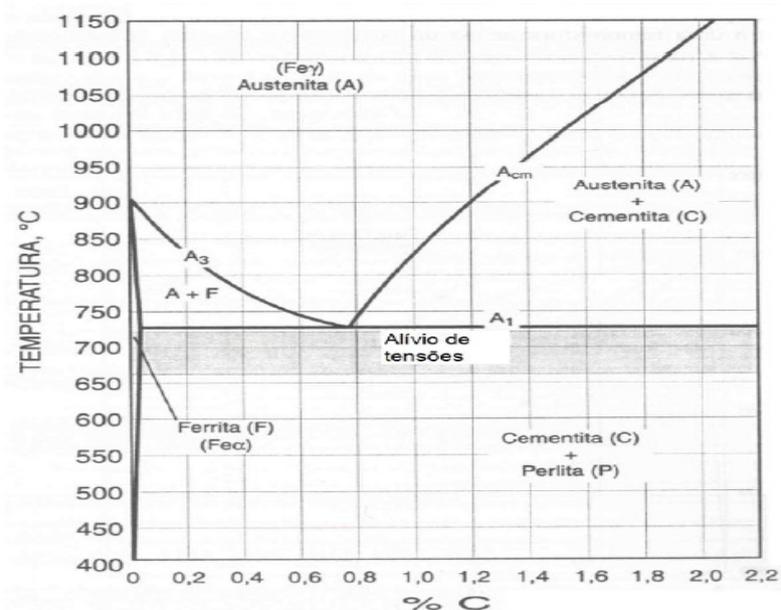
Para Chiaverini (2008, p. 59), as tensões residuais de usinagem, trabalho a frio e soldagem possuem grandes fontes de tensões. Na soldagem dos aços, a região adjacente à solda fica reprimida após a fusão que ali ocorre, sendo um local de concentrações de tensões.

Para evitar que novas tensões de origem térmica ocorram na operação de alívio de tensões, o aquecimento e o resfriamento devem ser lentos, principalmente para peças de grande seção ou conjuntos soldados (CHIAVERINI, 2008b, p. 59).

Silva e Mei (2006, p. 88) destacam que “[...] as principais transformações que ocorrem neste tratamento são a recuperação e a recristalização das fases encruadas.”

No Diagrama 2, observa-se que o aquecimento é feito abaixo da linha A1, permanecendo por um tempo necessário para o alívio das tensões residuais.

Diagrama 2 – Faixa de temperatura de alívio de tensões



Fonte: adaptado de Chiaverini (2008b, p. 95).

### 2.3.2 Tratamento térmico no aço ASTM A743 CA6MN

Em decorrência da alta dureza e da baixa tenacidade produzida por estruturas martensíticas, sua aplicação quase não ocorre na prática. Para que isso não ocorra, depois de temperados, realizou-se o revenimento nos aços, no intuito de proporcionar tenacidade e resistência mecânica desejada para a aplicação. Para isso, aqueceu-se o material a uma temperatura subcrítica, mantendo o aço nesta temperatura até que o material refine sua estrutura (CHIAVERINI, 2008b).

O aço CA6-MN é o metal utilizado na construção de rotores para turbinas hidráulicas em razão da sua boa soldabilidade. Porém, os processos de soldagem geram tensões localizadas em torno da solda. Com isso, o material necessita de um alívio de tensões pós-soldagem para não ocorrerem falhas durante seu processo e operação.

Em decorrência de a temperatura de alívio de tensões e revenimento ser a mesma, Gouveia (2008, p. 29) ressalta que “Este revenimento é justificado pelo fato destes aços, apesar de possuírem um baixo teor de carbono, possuírem baixa tenacidade na condição temperada (inferior a 35J na temperatura ambiente).”

À temperatura que este alívio de tensões é feito possui grande importância, pois “[...] temperaturas de revenimento maiores provocam o surgimento de austenita instável, que por sua vez transforma-se em martensita no resfriamento, elevando os limites de resistência e de escoamento e piorando a tenacidade.” (GOUVEIA, 2008, p. 29).

### 2.4 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS NO AÇO ASTM A743 CA6MN

Os elementos explorados a seguir estão relacionados à composição química do aço em estudo e seguem o embasamento teórico proposto por Silva e Mei (2006) e Souza (1989).

#### 2.4.1 **Carbono**

O carbono aumenta o limite de resistência à tração, à dureza, à temperabilidade e à resistência ao desgaste do aço, mas diminui a tenacidade e a soldabilidade.

Com esse aumento na resistência ao desgaste, mais difícil se torna a usinabilidade. E quanto maior o teor de carbono, mais elevada a sua fragilidade.

#### 2.4.2 **Manganês**

Aumenta a endurecibilidade moderadamente. Sua principal função é combinar-se com o enxofre, formando o sulfeto de manganês, impedindo a formação do sulfeto de ferro, que causa a fragilização do aço.

Melhora a ductilidade a esforços estáticos e dinâmicos. No revenimento, reduz a velocidade de amolecimento da estrutura temperada.

#### 2.4.3 **Silício**

Aumenta a fluidez em aços para a fundição e melhora a resistência à fragilização pelo hidrogênio.

No entanto, diminui a usinabilidade dos aços e aumenta a resistência à corrosão em ambiente alcalino, a resistência mecânica e a dureza. Uma de suas principais funções é ser agente desoxidante.

#### 2.4.3 **Enxofre**

Está sempre presente nos aços como elemento residual em baixos teores. É considerado uma impureza, pois causa fragilidade a frio e a quente, diminuição da resistência mecânica, resistência à fadiga, resistência ao impacto e baixa a ductilidade.

#### 2.4.4 **Fósforo**

O fósforo é um estabilizador da ferrita, endurecendo-a por entrar em solução nesta em aços de baixo carbono, causando fragilidade do material. Aumenta a resistência à corrosão atmosférica e em ambientes ácidos e a usinabilidade de aços de usinagem fácil.

#### 2.4.5 **Níquel**

O níquel aumenta a resistência mecânica e a dureza da ferrita sem diminuir sua ductilidade e tenacidade, até um valor de 0,5%. Evita a formação de cementita nos contornos de grão dos aços normalizados, contribuindo para o aumento da ductilidade.

#### 2.4.6 Cromo

Sua principal função é aumentar a resistência à corrosão, à oxidação e também eleva as propriedades mecânicas de resistência. Teores mais altos de cromo são mais efetivos para o combate à corrosão por sulfeto em altas temperaturas. Resiste ao desgaste e aumenta a endurecibilidade.

#### 2.4.7 Molibdênio

Aumenta fortemente a temperabilidade dos aços. Eleva a resistência e a dureza a altas temperaturas e a resistência à corrosão. Contrabalança a tendência à fragilidade de revenido e forma películas resistentes à abrasão.

Com o cromo, diminui o ataque do aço pelo hidrogênio a temperaturas elevadas.

### 2.5 FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE CORROSÃO

A corrosão é um fenômeno de interface que afeta materiais orgânicos e principalmente materiais inorgânicos. Manifesta-se por meio de reações químicas irreversíveis acompanhadas da dissolução de um elemento químico do material para o meio corrosivo ou da dissolução de uma espécie química do meio material (GEMELLI, 2001, p. 1).

Uma reação de corrosão implica então a transferência de elétrons entre um elemento químico do material e outro do meio. Essa transferência de elétrons pode ocorrer mediante um mecanismo químico, chamado corrosão química, ou por intermédio de um mecanismo eletroquímico, chamado corrosão eletroquímica (GEMELLI, 2001, p. 1).

Os custos de corrosão devem-se essencialmente a dois tipos de corrosão, segundo Gemelli (2001, p. 2): “A corrosão úmida representa o ataque em presença de um eletrólito aquoso, contrariamente à corrosão seca, que representa a corrosão do eletrólito líquido. Na literatura, a expressão corrosão seca é, às vezes, utilizada para designar a corrosão a temperaturas elevadas.”

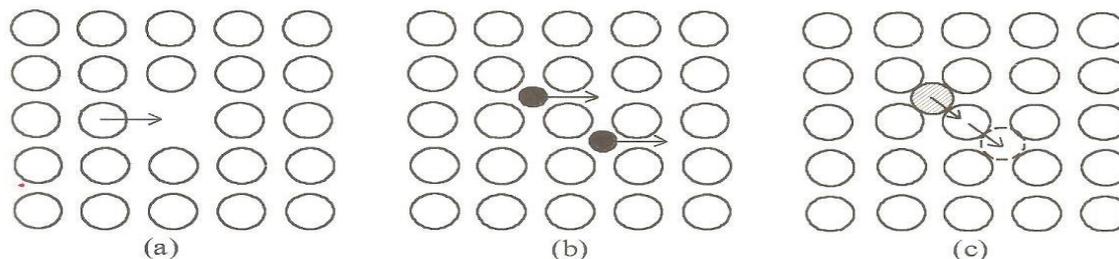
À temperatura elevadas, a ativação térmica é responsável pela difusão iônica por meio da camada de corrosão. A difusão em volume e nos contornos dos grãos no metal ou na camada de corrosão constitui, então, o mecanismo de transporte preponderante (GEMELLI, 2001, p. 112).

Na corrosão a temperaturas elevadas, a difusão também é responsável por outros fenômenos como deformação plástica por fluência, recristalização e crescimento de grão da camada de corrosão (GEMELLI, 2001, p. 116).

Em um sólido cristalino, a difusão pode ocorrer por meio dos defeitos pontuais, ou seja, as lacunas e os íons intersticiais. Também podem ocorrer defeitos lineares e planares, compostos principalmente de discordâncias e contornos de grãos (GEMELLI, 2001, p. 122).

Na Figura 1 podem-se analisar os principais mecanismos de difusão em estado sólido.

Figura 1 – Mecanismos difusionais no estado sólido: (a) difusão lacunar, (b) difusão intersticial direta e (c) difusão intersticial indireta



Fonte: Gemelli (2001, p. 123).

Outro tipo de corrosão é a carbonetação, que segundo Gentil (2003, p. 128):

Se a temperatura for muito alta, o carbono vai-se difundindo para o interior de ligas como aços inoxidáveis, provocando a precipitação dos carbonetos de cromo, titânio ou vanádio. Essa precipitação ocasiona o enfraquecimento mecânico das ligas, a diminuição da resistência à corrosão [...] dando condições para a corrosão eletroquímica quando em presença de um eletrólito.

## 2.6 ENSAIO DOS MATERIAIS

### 2.6.1 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza ou simplesmente a medida de dureza possui um ensaio bastante simples e traz consigo uma informação bem valiosa. Souza (2004, p. 103) ressalta que: “A propriedade mecânica chamada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de diversos materiais.”

Há três tipos principais de ensaios de dureza, por penetração, por choque e por risco. O ensaio de dureza por risco não é muito utilizado, sua principal função é determinar que material risca determinado material, utilizado na escala de dureza Mohs. O ensaio de dureza por choque nada mais é do que um corpo abandonado a uma certa altura do material, deixando uma impressão na superfície da amostra (SOUZA, 2004).

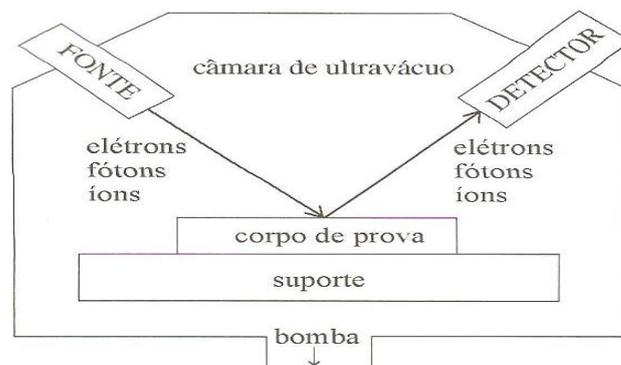
Os tipos de ensaios de dureza por penetração mais conhecidos no ramo da mecânica são: o ensaio de dureza Rockwell, Brinell, Vickers, Knoop e Meyer. Callister Júnior (2002, p. 94) descreve como principais pontos fortes do ensaio de dureza ser simples e baratos, considerando que os corpos de prova não necessitam de especial preparação; o ensaio ser não destrutivo, dependendo da aplicação, pode continuar tendo sua aplicação e; a estimativa de outras propriedades do material, em razão do resultado do ensaio.

### 2.6.2 Espectrometria de emissão ótica

No estudo de corrosão, as técnicas de análise de superfícies são, muitas vezes, indispensáveis para se identificarem os produtos de reação que aderem à superfície do material (GEMELLI, 2001, p. 160)

Segundo Gemelli (2001, p. 160), o princípio geral destas técnicas de caracterização consiste em enviar um feixe de elétrons, raios X (fótons) ou íons, chamados de fonte de excitação, sobre o material em estudo, chamado de alvo. A interação deste feixe de ondas ou de partículas com os átomos ou íons do sólido provoca uma perturbação superficial. Em resposta, o sólido também emite elétrons, fótons ou íons, chamados de sinais, detectados e analisados pelo equipamento.

Figura 2 – Princípio de funcionamento das técnicas de análise química



Fonte: Gemelli (2001, p.160).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada consistiu de ensaio de dureza, análise metalográfica e composição química, verificando-se a estrutura dos aços.

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a concretização do estudo se utilizou como material base o aço inoxidável martensítico macio ASTM A743 CA6MN fundido. O material foi fornecido por uma empresa do Oeste de Santa Catarina material se encontra na condição normalizado e revenido. Como material secundário, empregou-se o aço carbono, fornecido pelo laboratório de usinagem da Universidade do Oeste de Santa Catarina de Joaçaba.

Na Tabela 1 se pode analisar a composição química do aço base em estudo. Com os valores máximos e a interface entre os extremos (máximo e mínimo) que cada componente químico pode ter em porcentagem no aço ASTM A743 CA6MN.

Tabela 3 – Composição química nominal do aço ASTM A743 CA6MN

Material	Composição (%)							
	C (máx.)	Mn (máx.)	Si (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Ni	Cr	Mo
ASTM A743 CA6MN	0,06	1,00	1	0,04	0,03	3,5-4,5	11,5-14	0,4-1

Fonte: adaptado da norma ASTM: A743/A743M06 (2006).

Em razão da abrangente solitação de esforços que o aço em estudo é submetido, ele deve possuir elevadas propriedades mecânicas para que nas situações de trabalho impostas a ele não ocorram falhas; as próprias podem ser acompanhadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas nominais do aço ASTM A743 CA6MN.

Propriedades mecânicas à temperatura ambiente		
Propriedade	Valores típicos	Mínimos requeridos
Limite de resistência à tração (MPa)	830	755
Limite de escoamento ( 0,2%, MPa)	690	550
Alongamento, em 2in (%)	24	15
Redução de área (%)	60	35
Dureza Brinell (HB)	268	285 ( máx.)

Fonte: adaptada de Gouveia (2008).

### 3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico realizado para esse experimento foi o alívio de tensões. Esse procedimento foi realizado em um forno elétrico, marca Jung, modelo 4213, fabricado em 2010, com 5,3 KW de potência. A variação de temperatura interna do forno foi de  $\pm 6$  °C, e o modelo do controlador de temperatura é N1100.

Para a diversificação dos tratamentos e a comparação dos resultados obtidos após os ensaios, tem-se quatro condições de trabalho:

- Condição 1: Amostra sem tratamento térmico;
- Condição 2: Amostra tratada termicamente, afastada do corpo de aço carbono;
- Condição 3: Amostra tratada termicamente, encostada ao corpo de aço carbono;
- Condição 4: Amostra tratada termicamente, presa ao corpo de aço carbono.

Na condição 4, em que a amostra de ASTM A743 CA6MN é tratada termicamente presa ao corpo de aço carbono, foi utilizado para tal um arame galvanizado Belgo, com resistência mecânica de 40-55 kgf/mm<sup>2</sup> e 1,24 mm de espessura. Nas Fotografias a seguir se observam as condições de tratamento térmico utilizadas no estudo.

Fotografia 1 – (a) Amostra tratada termicamente, afastada do corpo de aço carbono, (b) Amostra tratada termicamente, encostada ao corpo de aço carbono e (c) Amostra tratada termicamente, presa ao corpo de aço carbono



(a)

(b)

(c)

Fonte: os autores.

O alívio de tensões ocorreu com taxas de aquecimento e resfriamento diversificadas, isso para considerar a espessura dos corpos de prova; a faixa de temperatura patamar ocorreu em todas as condições em 620 °C. Na Tabela a seguir analisam-se os respectivos dados que envolvem o alívio de tensões nas condições 2, 3 e 4.

Tabela 5 – Condições de tratamento térmico empregadas

Condição	Espessura (mm)	Taxa de aquecimento (°C/h)	Temperatura de patamar (°C)	Tempo de patamar (h)	Taxa de resfriamento (°C/h)
2	$e \leq 25,4$	220	620	2	275
3	$25,4 > e > 31,8$	170	620	2	220
4	$25,4 > e > 31,8$	170	620	2	220

Fonte: os autores.

### 3.3 ENSAIOS DE DUREZA

Para a análise das propriedades mecânicas, utilizou-se o ensaio não destrutivo de dureza, o qual foi realizado no laboratório da Unoesc Joaçaba, SC. As medidas de dureza foram realizadas, em escala Rockwell C (HRC), com um durômetro unidirecional da marca Mitutoyo, com modelo Durotwin (DT-20), possuindo penetrador com ponta de diamante e ângulo 120°, com carga de 150 kg.

Efetivaram-se quatro impressões sobre a superfície das amostras de aço ASTM A743 CA6MN nas seções longitudinal e transversal.

### 3.4 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

A análise metalográfica do aço ASTM A743 CA6MN realizou-se no Laboratório de Materiais da Unoesc. Para esta análise as amostras foram devidamente preparadas e conseqüentemente atacadas pelo reagente composto de três partes glicerina, uma parte de ácido nítrico concentrado e duas partes de ácido clorídrico concentrado e, posteriormente, observadas em microscópio.

### 3.5 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA

Para analisar as propriedades químicas se utilizou o ensaio de espectrometria de emissão ótica, podendo comparar, então, as porcentagens de cada elemento químico presente no aço em estudo. O ensaio foi realizado no Laboratório da Metalab em Joinville, SC.

## 4 RESULTADOS

Os resultados foram baseados na análise da microestrutura e da composição química, com a análise do resultados de dureza.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO MATERIAL

Na sequência, pode-se analisar a microestrutura do aço em estudo por meio de metalografia. Primeiramente, analisando as amostras do aço ASTM A743 CA6MN, em que não ocorreu o alívio de tensões e em seguida nas outras condições de estudo.

Fotografia 2 – Microestrutura do ASTM A743 CA6MN, sem alívio de tensões



Fonte: os autores.

A microestrutura do material ilustrado é característica de um aço martensítico, o qual é composto de uma matriz de martensita acicular, típica de aços de baixo teor carbonado. A microestrutura é formada por agulhas muito finas de martensita.

Fotografia 3 – (a) Microestrutura do aço ASTM A743 CA6MN, com alívio de tensões afastado do aço carbono, (b) Microestrutura do ASTM A743 CA6MN, com alívio de tensões encostado ao corpo de aço carbono e (c) Microestrutura do ASTM A743 CA6MN, com alívio de tensões preso ao corpo de aço carbono



(a)

(b)

(c)

Fonte: os autores.

As microestruturas apresentadas anteriormente são característica de um material temperado e após revenido, a qual é composta de uma matriz de martensita acicular, típica de aços de baixo teor de carbono na condição revenido.

Além da martensita, podem-se observar também traços de ferrita e austenita. A austenita surge em razão das baixas velocidades, de resfriamento do material fundido e durante o alívio de

tensões, e também por conter em sua composição elementos estabilizadores da austenita como carbono e níquel, considerando que a quantidade seja estimada de no máximo 5%.

## 4.2 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A avaliação da composição química do aço ASTM A743 CA6MN ocorreu por meio de espectrometria ótica, visando à concentração de cada elemento; novamente primeiro as amostras sem alívio de tensões e posteriormente as demais foram ponderadas. As condições de avaliação são as utilizadas no tratamento térmico.

Tabela 6 – Teor de composição química do aço ASTM A743 CA6MN

Condição	Teor de composição química (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Normatizada	0,06	1	1	0,04	0,03	11,5-14	0,04-1	3,5-4,5
1	0,058	0,63	0,4	0,023	0,005	12,29	0,59	3,86
2	0,06	0,64	0,41	0,024	0,006	12,39	0,6	3,94
3	0,06	0,61	0,38	0,016	0,003	12,09	0,56	3,68
4	0,059	0,65	0,4	0,022	0,006	12,2	0,58	3,87

Fonte: os autores.

Segundo a norma ASTM A743/A 743M – 06, a composição química nominal do aço CA6MN é a representada na Tabela 6; por meio de comparações, todas as outras amostras se encaixam dentro dos padrões estabelecidos, não havendo variações entre a amostra sem tratamento de alívio de tensões e as demais.

## 4.3 ANÁLISE DA DUREZA

As medidas de dureza foram realizadas, em escala Rockwell C (HRC). Novamente as condições de trabalho devem ser consideradas, havendo quatro impressões sobre cada amostra analisada, tendo duas amostras em cada condição.

Tabela 7 – Medidas de dureza (HRC)

Condição	Dureza (HRC)			
	1	2	3	4
1	29	29	29,5	29
2	29,5	30,5	30,5	30
3	29	30	30,5	31
4	27	28,5	30	28
1.1	27,5	30	27,7	28
2.1	28,5	27	27	28,5
3.1	27	29	30,51'	29
4.1	27,5	29	30	31

Fonte: os autores.

Mediante a análise dos dados finais obtidos se pode observar que não há variações significativas entre as amostras ensaiadas. Se analisar as duas amostras dentro da mesma condição e as amostras em todas as condições entre si, a variação é pouco significativa, não afetando as propriedades mecânicas do material em estudo.

## 5 CONCLUSÃO

Pela proposta realizada, verifica-se, por intermédio dos ensaios realizados, que não há indícios de contaminação quando o aço inox ASTM A743 CA6MN é tratado termicamente em conjunto com aços carbono, pois não há variações significativas nas composições químicas, nas propriedades mecânicas e na microestrutura do material estudado.

No presente trabalho a composição química foi o fator de maior influência para a avaliação da contaminação; os resultados obtidos se enquadram dentro da norma A743/A 743M – 06, em que todos os elementos, em cada condição apresentada, localizaram-se dentro dos padrões. Assim, pelas condições de estudo, não se há vestígios expressivos de que ocorra contaminação, principalmente pelo carbono, o qual, em razão das temperaturas muito elevadas e em excesso, difunde-se internamente em ligas de aço inox, provocando a precipitação de carbonetos, oportunizando à corrosão, diminuição das propriedades do aço e futuramente, ocasionando falhas.

Com a microscopia ótica, as microestruturas alcançadas estão de acordo com a literatura, para o alívio de tensão com temperatura patamar de 620 °C, em que se observou que tanto nas amostras sem alívio de tensões tanto com este, tem-se uma estrutura martensítica acicular acompanhada de ferrita e, em decorrência do revenimento, apresenta também uma pequena quantidade de austenita.

Comparando os resultados do ensaio de dureza, os valores possuem um desvio muito pequeno, não havendo, assim, grandes variações entre as condições estudadas e nem diminuição das propriedades mecânicas.

Por fim, pelo trabalho realizado, acredita-se que não há necessidade de realizar o tratamento térmico no aço ASTM A743 CA6MN isoladamente, pois não há alterações expressivas de nenhuma de suas propriedades em questão; com isso, as empresas podem aumentar sua produção e otimizar seu tempo.

## REFERÊNCIAS

A743/A743M-06: Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application, 2006.

CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. São Paulo: LTC, 2002. 408 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008a. 599 p.

\_\_\_\_\_. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008b. 272 p.

GEMELLI, Enori. **Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização**. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 183 p.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 341 p.

GOUVEIA, Ruimar Rubens de. **A influência da temperatura de interpasse na tenacidade de solda na soldagem multipasse do aço inoxidável martensítico CA6MN pelo processo TIG**. 2008. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <[http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao\\_093\\_ruimar\\_rubens\\_de\\_gouveia.pdf](http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_093_ruimar_rubens_de_gouveia.pdf)>. Acesso em: 28 abr. 2012.

SILVA, André Luiz V. da Costa; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Blucher, 2006. 646 p.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição Química dos Aços**. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 134 p.

