

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA**

**ESTUDO DE CASO PARTICULAR DE SOLDAGEM DE  
MATERIAIS DISSIMILARES EM AÇO BAIXA LIGA X  
AÇO INOXIDÁVEL**

**Janaina Sasai Amaral**

Monografia apresentada à Faculdade  
de Tecnologia de Pindamonhangaba, para  
graduação no Curso Superior de  
Tecnologia em Metalurgia.

**Pindamonhangaba - SP  
2012**

# **FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA**

## **ESTUDO DE CASO PARTICULAR DE SOLDAGEM DE MATERIAIS DISSIMILARES EM AÇO BAIXA LIGA X AÇO INOXIDÁVEL**

**Janaina Sasai Amaral**

Monografia apresentada à Faculdade  
de Tecnologia de Pindamonhangaba, para  
graduação no Curso Superior de  
Tecnologia em Metalurgia.  
Área de Concentração: Soldagem em Montagem Industrial  
Orientador(a): Profª Dr.ª Cristina Ares Elisei

**Pindamonhangaba - SP  
2012**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA**

**ESTUDO DE CASO PARTICULAR DE SOLDAGEM DE  
MATERIAIS DISSIMILARES EM AÇO BAIXA LIGA X  
AÇO INOXIDÁVEL**

**Janaina Sasai Amaral**

Monografia apresentada à Faculdade  
de Tecnologia de Pindamonhangaba, para  
graduação no Curso Superior de  
Tecnologia em Metalurgia.

**Comissão Examinadora**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cristina Ares Elisei**

**Prof. Dr. José Vitor Cândido de Souza**

**Prof. Benedito Ivan S. Araújo**

**Pindamonhangaba, 31 de Outubro de 2012.**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha família e ao pessoal da Qualidade da Confab Tubos, que disponibilizou as máquinas e a mão de obra necessária á conclusão do mesmo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de realizar o sonho de me graduar. Agradeço também ao meu amado irmão Reinaldo Sasai Amaral e ao meu marido Laece Luiz Furtado Filho pela paciência e pelo apoio e ao meu filho, João Victor, grande motivação da minha vida, que ainda habita em mim, fuguras tão essenciais à conquista deste diploma, pois vontade, nunca me faltou!.

“Não há nada impossível; há só vontades mais ou menos enérgicas”  
Julio Verne.

Amaral, J.S. *Estudo de Caso Particular de Soldagem de Materiais Dissimilares*, 2012. Monografia (Graduação em Tecnologia da Metalúrgia)- (Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza). Pindamonhangaba, 2012.

## RESUMO

Os processos de soldagem são conhecidos por necessitar de mão de obra especializada e treinada, portanto qualquer redução de homem-hora nesta fase ou em qualquer etapa dos requerimentos especiais pré e ou pós soldagem é significativa para o custo global da obra.

O Estudo surgiu durante a Montagem de um Forno de uma planta Petroquímica. Considerado o escopo mais caro da obra, a soldagem foi escolhida propositalmente como ponto de partida do *brainstorming*. Uma soldagem de campo entre aços dissimilares de cordão fisicamente insignificante (300 mm x 2 mm), era realizando durante a fase de montagem foi escolhido como um evento de alto custo, mas com possíveis alternativas no timing da obra e motivou este trabalho.

Durante a análise crítica, concluiu-se que: o tratamento térmico exigido pela norma pode acontecer simultaneamente à fase de secagem preliminar dos refratários e ou no *start up* sem comprometer a estrutura da ZAT (zona afetada termicamente), visto que a dureza obtida no “*mock up*” ficou dentro dos padrões estipulados pelas normas aplicáveis em todos os casos.

Haja vista que este foi um estudo direcionado à melhoria de processos e redução de custos, outra fase se mostrou ainda mais pertinente que a secagem dos refratários. A fase de fabricação das serpentinas foi escolhida por otimizar e garantir os requisitos de soldagem conforme as normas sem exceções. Utilizando um artifício simples, que consiste na soldagem de almofadas de inox, o mesmo tipo da chapa de contato do *skin point* que instrumenta a serpentina da radiação, o que evitou o Tratamento Térmico em campo, sem alterar e nem onerar nenhuma outra fase do projeto, promovendo uma economia de estimada de R\$500.000,00 à R\$800.000,00.

Testes de dureza serão utilizados para garantir o requerimento normativo (241 HB) pós soldagem, pós simulação de secagem, assim como macrografias das ZATs (zonas térmicamente afetadas pelo calor) de forma a localizá-las e quantificar as microturezas após cada processamento que simulará a condição real em um *Mock up*!

Essa medida foi adotada para toda a instrumentação das serpentinas que exigisse tratamento térmico em campo nos fornos fabricados posteriormente à este estudo.

PALAVRAS CHAVE: Aços, Requerimentos de Soldagem, Redução de Etapas e Custo.

## ABSTRACT

A field welding between dissimilar steels with a cord physically insignificant (300mm x 2mm), but high cost, was nominated for this study. Welding procedures are known by requiring specialized labor, skilled and trained for this case any reduction of man-hours at this stage or at any stage of the special requirements, pre or post welding is significant to the overall cost of the project.

This work arose during the assembly of a furnace in a Petrochemical Plant. Considered the most expensive scope of work, welding was purposely chosen considering it's high cost, but with possible alternatives in the execution during the scope, we were looking for timing during the project and it motivates the brainstorming, object of this study.

It was concluded that: the heat treatment required by the standard may occur simultaneously with the primary drying phase of the refractory and or start-up without compromising the structure of the HAZ (heat affected zone); whereas the hardness in the "mock up" was within the standards required by the rules applicable in all cases. Considering that this was a study shall be driven improvement of processes and cost reduction, another phase has shown more appropriate that the drying out of the refractory.

The manufacturing phase of the serpentines has been chosen to optimize and ensure the requirements of welding according to the norms without exceptions. Using a simple device, consisting of the welded pads of stainless steel, the same type of plate contact of the skin point, in the serpentine of the radiation, which has avoided the heat treatment on the field, without affecting, and not encumbering any other stage of the project, providing an economy estimated from U\$ 300.000,00 to U\$ 380.000,00.

Hardness tests provides the normative requirement (241 HB), post weld, post drying, as micrographics of HAZ (heat affected zone), to localize and quantify the micro hardness after each process and provide a real condition simulated by a *Mock up*<sup>1</sup>.

This measure was adopted for all instrumentation of the serpentines that would require heat treatment, for all furnaces that will be done after this study.

KEYWORDS: Steels, Welding Requirements, and Cost Reduction.

*Mock up<sup>1</sup>: corpo de prova específico, confeccionado a partir de exertos do próprio material utilizado no projeto.*

## INTRODUÇÃO

Certificações de Qualidade e Sistemas de Gestão Integrada são cada vez mais difundidos e adotados por empresas e indústrias em caráter mundial, não só para atender às adequações do mercado globalizado, mas cada vez mais são encaradas como sinônimo de eficácia e técnica, garantindo assim o melhor filão de mercado. Ao usar ferramentas da Qualidade conhecidas como ferramentas de melhoria contínua, e aplicar á uma obra de montagem industrial onde impreverivelmente tempo é dinheiro e prova ser possível aplicar estratégias de melhoria do processo, ao encarar as diversas fases da obra como diferentes estágios de uma linha de produção, ou seja, garantir o aprimoramento do processo até que se atinja a excelência desde a matéria prima até o produto final de montagem. É fato que minimizar o consumo de recursos dentro do domínio do tempo disponível e da qualidade pretendida são as metas de excelência na gestão de qualquer projeto. A montagem de um equipamento conhecido como forno, completamente finalizado e pronto para operar vai comportar uma adaptação no processo de fabricação e montagem de forma que se possa ganhar tempo e ainda assim promover a economia de etapas e a redução de custos em outras obras semelhantes. A busca por agregar valor a tarefas já existentes é uma forma de implementar a ferramenta de melhoria contínua de processos a um estudo de caso de soldagem em aços dissimilares visando melhor adequar os requerimentos dos processos de soldagem as etapas de fabricação e montagem, de forma que haja otimização dos processos e possível redução de custo.

Eliminar processamentos desnecessários ou criar situações em que os processamentos são feitos em etapas alternativas ou complementares do processo de fabricação, construção, montagem e ou comissionamento (teste) é o objetivo deste trabalho tendo como foco a busca de soluções para reduzir custos, no caso, da soldagem em campo, analisando cada etapa, com a finalidade de identificar eventos redundantes nas fases pertinentes ao projeto. A Soldagem de aços dissimilares ligados implica em alto custo antes, durante e depois da soldagem devido a requerimentos específicos, neste caso vinculados aos requisitos mais críticos resultantes da soldagem de aços baixa liga. Esses procedimentos implicam no custo de forma impactante, visto que a soldagem é um escopo bastante custoso, principalmente as soldagens executadas em campo. Neste forno, os materiais soldados a que nos referimos trabalharão á temperaturas superiores a 700°C, as quais são consideradas relativamente altas.

Implementar a ferramenta de melhoria contínua de processos a um estudo de caso Específico de Soldagem em aços dissimilares, visando melhor adequar os requerimentos dos processos de soldagem às etapas de fabricação, construção, montagem e teste, de forma que haja otimização dos processos e possível redução e/ou sobreposição de etapas.

Menos etapas, mais economia!Um velho conceito, com novas aplicações!

Obs: A soldagem supracitada é pertinente a Instrumentação de Fornos de Unidades de Reforma Catalítica de plantas Petroquímicas.

## JUSTIFICATIVA

Como função, soldas de instrumentação têm uma alta restrição, visto que são responsáveis por indicar a temperatura ou pressão do forno. A precisão deste instrumento é condição “*si ne qua non*”<sup>1</sup> para um bom funcionamento do referido equipamento e garantia da sua confiabilidade em operação.

Por outro lado o volume insignificante de material de soldagem que faz a junção entre a chapa de contato e a serpentina é de alto custo quando soldada em campo e nos motiva a estudar uma maneira mais eficaz de executar esta soldagem durante uma etapa mais confortável do projeto e que de preferência economize ao máximo tempo e dinheiro.

<sup>1</sup> “*si ne qua non*”: do francês expressão que remete a ideia de indispensável, que não pode deixar de ser feito.

## OBJETIVO

Aproveitar os processamentos de partida do forno para abolir o tratamento térmico das juntas em questão na fase de soldagem de campo e assim justificar a exceção (ao requerimento) a norma de soldagem aplicável descrita no documento de inspeção e execução de soldagem (IEIS) pertinente a este escopo, deixando de realizar o Tratamento Térmico indicado ao Aço ASTM335 P9, imediatamente após a execução da soldagem em campo, para utilizar a secagem preliminar dos refratários do forno e os processamentos de partida com este duplo fim, garantindo assim a dureza requerida pela norma AISI B31.1.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	6
JUSTIFICATIVA.....	7
OBJETIVO.....	8
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
<b>1. AÇOS.....</b>	<b>13</b>
1.1 ESTRUTURA .....	13
<b>1.1.2 temperaturas de mudança de estrutura do ferro puro.....</b>	<b>13</b>
1.2 DIAGRAMA FE-C DE FASES EM EQUILÍBRIO.....	15
1.3 TIPOS DE AÇOS .....	16
<b>1.3.1 aços ao carbono.....</b>	<b>16</b>
1.3.1.2 efeito da composição química .....	17
1.3.1.3 influência dos elementos de liga (teores residuais).....	18
1.3.1.4 soldabilidade e tratamentos térmicos.....	20
1.3.1.5 efeitos de altas temperaturas nos aços carbono .....	21
1.3.1.6 efeito das baixas temperaturas nos aços carbono.....	22
1.3.1.7 corrosão nos aços carbonos. ....	24
<b>1.3.2 aços inoxidáveis.....</b>	<b>25</b>
1.3.2.1 aços inoxidáveis austeníticos.....	26
1.3.2.1.1 corrosão em geral (austeníticos) .....	28
1.3.2.2 aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos .....	30
<b>1.3.3 aços-liga .....</b>	<b>33</b>
1.3.3.1 serviços de aplicação dos aços-liga .....	34
1.3.3.1.1 altas temperaturas .....	34
1.3.3.1.2 baixas temperaturas .....	34
1.3.3.1.3 alta corrosão .....	35
1.3.3.1.4 sem contaminação .....	35
1.3.3.1.5 segurança .....	35
1.3.3.2 aços-liga de molybdeno e cromo-molybdeno.....	35
1.3.3.2.1 fatores críticos dos aços CrMo.....	36
1.3.3.2.2 soldabilidade dos aços liga .....	37
1.3.3.3 aços 9cr-1Mo (metal base).....	41
1.3.3.3.1 classificações equivalentes:.....	41
1.3.3.3.2 aplicações:.....	41
1.3.3.3.3 soldagem dos aços cromo molibdeno (9Cr-1Mo).....	42
1.3.3.4 procedimento de soldagem .....	42
1.3.3.5 seleção de consumíveis .....	43
2.0 TRATAMENTOS TÉRMICOS .....	44
2.1 PRÉ-AQUECIMENTO .....	44
<b>2.1.1 Como determinar a temperatura de pré-aquecimento.....</b>	<b>46</b>
2.2 TIPOS MAIS COMUNS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS .....	48
<b>2.2.1 alívio de tensões .....</b>	<b>48</b>
<b>2.2.2 recozimento pleno .....</b>	<b>49</b>
<b>2.2.3 normalização.....</b>	<b>50</b>
<b>2.2.4 têmpera.....</b>	<b>51</b>
<b>2.2.5 revestimento.....</b>	<b>51</b>

2.3 ZAT /ZTA/ZAC (Zona Afetada pelo Calor ou Zona Térmicamente Afetada).....	51
3.0. ENSAIO DE DUREZA.....	52
<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
4.0 MATERIAIS DE BASE.....	55
4.1. MATERIAL DE BASE 1 : .....	55
4.1.1características .....	55
4.1.2 aplicações.....	55
4.1.3 composição química.....	56
4.2. MATERIAL DE BASE 2 : .....	56
4.2.1características .....	56
4.2.2 composição química.....	56
4.2.3outras características.....	56
4.3 METAL DE ADIÇÃO .....	56
4.3.1características .....	57
4.3.2 composição química.....	57
4.3.3 aplicações.....	57
4.4 INSTRUMENTOS DE PRECISÃO .....	57
4.4.1 durômetro de bancada:.....	57
4.4.3 paquímetro .....	58
4.4.4 alicate volt-amperímetro.....	58
4.4.5 termômetro infravermelho .....	58
4.4.6 forno para tratamento térmico.....	58
5.0 DOCUMENTOS TÉCNICOS / ANEXOS:.....	58
<b>6 AMOSTRAS .....</b>	<b>59</b>
<b>7 RESULTADOS &amp; DISCUSSÃO .....</b>	<b>60</b>
7.1 DUREZA: PRÉ TRATAMENTO TÉRMICO CROQUI COM 6 PONTOS DE MEDIÇÃO:.....	60
7.2 MACROGRAFIAS .....	60
7.3 DUREZA PÓS PROCESSAMENTOS SUPRACITADOS NAS FIGURAS 18, 19 E 20.....	62
<b>8 CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>65</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Alotropia do Fe.....	14
Figura 2:Macrografia Ferrita X Austenita.....	15
Figura 3: Diagrama de Fases em Equilibrio.....	16
Figura 4: Gráfico Limite de Escoamento X Dureza(HB).....	17
Figura 5 :Gráfico %Alongamento X % de Carbono ..	18
Figura 6 :Gráfico Limite de Resistência X Temperatura.....	21
Figura 7: Energia absorvida X Temperatura Ensaio.....	23
Figura 8: :Gráfico -Energia absorvida X Quantidade de Mn.....	24
Figura 9: Estrutura Metalúrgica de um aço inoxidável austenítico.....	26
Figura 10: :Gráfico- Tensão X Temperatura para aços .....	28
Figura 11: :Velocidade de Oxidação X % Cr. ....	36
Figura 12: Gráfico: % Carbono X CEquivalente. ....	37
Figura 13: Mecânismo de Retenção de Hidrogênio .....	38
Figura 14: :Trinca de Alívio de Tensão. ....	39
Figura 15: :Trinca tipo IV/Cavidades associadas a precipitação num aço P9 Modificado (P91) .....	40
Figura 16: :Temperaturas utilizadas em procedimentos de soldagem ASTM335 Gr.9 .....	43
Figura 17: Alterações micro estruturais e mecânicas decorrentes dos tratamentos térmicos pós-soldagem (esquemático).....	50
Figura 18: Temperatura de patamar 660° /12horas (CP1).....	60
Figura 19:Temperatura de patamar 740° ±10°C/2 horas(CP2).....	61
Figura 20:Temperatura de patamar 750° ± 30°C/2 horas(CP3).....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Limite de Resistência x Espessura da chapa .....	18
Tabela 2 ( Fonte: Apostila Engenharia de Materiais , Unianchieta, Prof. Dr. Aílton Cavalli).....	19
Tabela 3:Aços Austeníticos e suas Aplicações .....	29
Tabela 4:Aços Estabilizados X Aços ao Carbono.....	30
Tabela 5:Principais Designações Ferríticas e Martensíticas AISI(Fonte:Norma AISI) .....	31
Tabela 6: Principais Aços Inoxidáveis e suas características ( Fonte: Norma AISI) .....	32
Tabela 7:Especificações comerciais para Aços Inox ASTM( Fonte : Norma ASTM). .....	33
Tabela 8: Aços Cr. Molebidênio (Fonte: ASME Div VIII,2007).....	35
Tabela 9:Consumíveis de Soldagem (fonte: AWS) .....	44
Tabela 10:Temperaturas de pré aquecimento X C.Equivalente(Fonte:Modenesi,P.J; Marques, P.V; Bracarense, A.Q; Soldagem (Fundamentos e Tecnologia, UFMG,2005).....	47
Tabela 11:Tempo e Temperatura de Alivio de Tensões.....	49

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.0 AÇOS

Definição: O aço é uma liga de ferro-carbono contendo geralmente de 0,008% a 2,14% em peso, de carbono.

Carbono é uma impureza intersticial em ferro e forma uma solução sólida com cada uma das ferritas e também com austenita. Teores maiores de carbono são encontrados em aços altamente ligados como os que são usados na fabricação de matrizes e aços ferramenta.

O número elevado de aços com teores variáveis de carbono e o grande número de aços ligados e a diversidade dos elementos de liga levou à classificação dos aços, para assim facilitar a seleção eles foram divididos conforme sua composição química por associações técnicas de diversos países:

- AISI, SAE e ASTM (americanos)
- DIN (alemão)
- JIS (japonês)
- ABNT (brasileira- baseada nas americanas)

#### 1.1 Estrutura

- Ferro Puro: até 0,008% de Carbono
- Aço: 0,008 % até 2,14% de Carbono. Esta é a quantidade máxima de carbono que podemos ter na austenita à 1148°C.
- Ferro Fundido: 2,14% até 6,7% de Carbono
- $Fe_3C$  (CEMENTITA): Forma-se quando o limite de solubilidade do carbono é ultrapassado (6,7% de C). (Callister, 1991)

##### 1.1.2 Temperaturas de mudança de estrutura do ferro puro

- 1538°C: Começa a solidificar, apresenta a fase DELTA ( $\delta$ ) com estrutura tipo cúbica de corpo centrado (CCC).
- 1394°C: Ocorre uma mudança de fase para GAMA ( $\gamma$ ) onde os átomos de ferro sofrem um rearranjo para uma estrutura cúbica de face centrada (CFC).
- 912°C: Novo rearranjo cristalino de corpo centrado (CCC) para nova fase ALFA ( $\alpha$ ).
- Abaixo 768°C: Conhecido como ponto CURIE o ferro passa a apresentar um comportamento magnético sem sofrer qualquer alteração em sua estrutura cristalina, o que representa um estágio de arrumação e alinhamento eletrônico das camadas de elétrons de forma organizada, ou neste caso polarizada pelos spins. Formando um campo eletromagnético. (Callister, 1991)

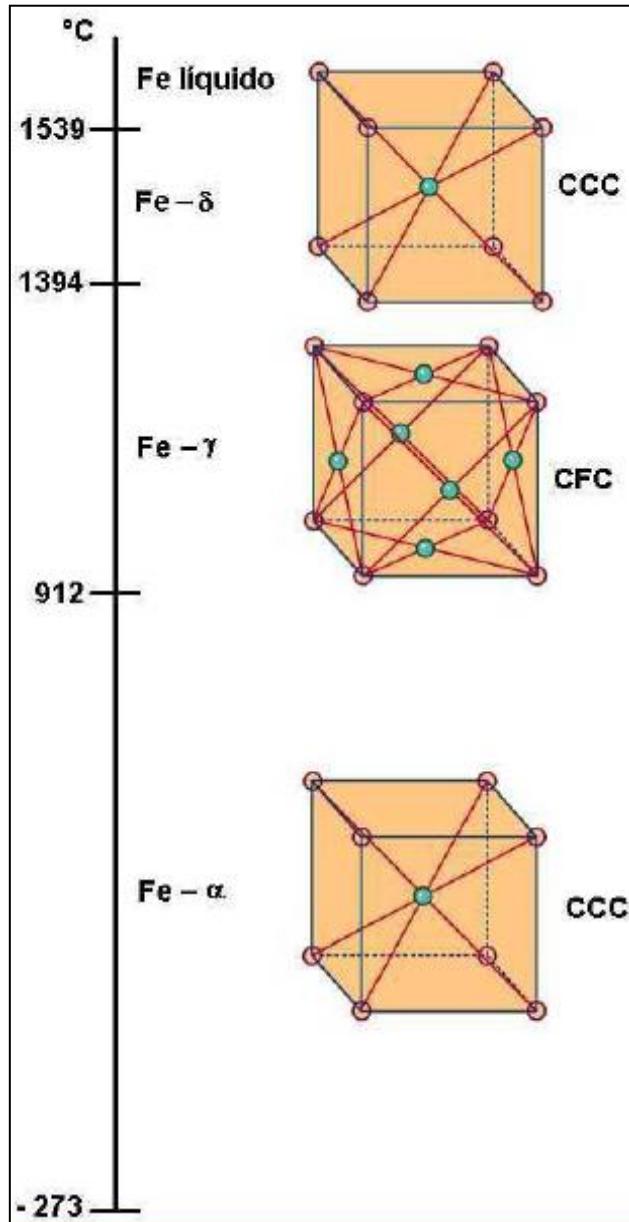


Figura. 1:Alotropia do Fe (Apostila Uni Anchieta- Prof.Dr. Aílton Cavalli).

Na ferrita CCC, apenas pequenas concentrações de carbono são solúveis; a máxima solubilidade é 0,022%C em peso a 727°C. A limitada solubilidade é explicada pela forma e tamanho das posições intersticiais, que torna difícil acomodar os átomos de carbono. Mesmo embora presente em relativamente baixas concentrações, o carbono afeta significativamente as propriedades mecânicas da ferrita. Esta particular fase ferro-carbono é relativamente macia, pode ser tornada magnética em temperaturas inferiores a 768°C e tem uma densidade de 7,88g.cm<sup>3</sup>(Figura 2).

A austenita, ou a fase do ferro, quando em liga justamente com o carbono, não é estável abaixo de 727°C. A máxima solubilidade de carbono na austenita, 2,11%C em peso a 1148°C. Esta solubilidade é aproximadamente 100 vezes maior do que a máxima para a ferrita CCC, que as posições intersticiais CFC têm formato tal que quando os átomos de carbono os enchem, as deformações impostas sobre os circunvizinhos átomos de ferro são muito menores. Como

demonstrado nas discussões que se seguem, transformações de fase envolvendo austenita são muito importantes no tratamento térmico dos aços. (Figura 2).

De passagem, dever-se-ia mencionar que austenita é não magnética.

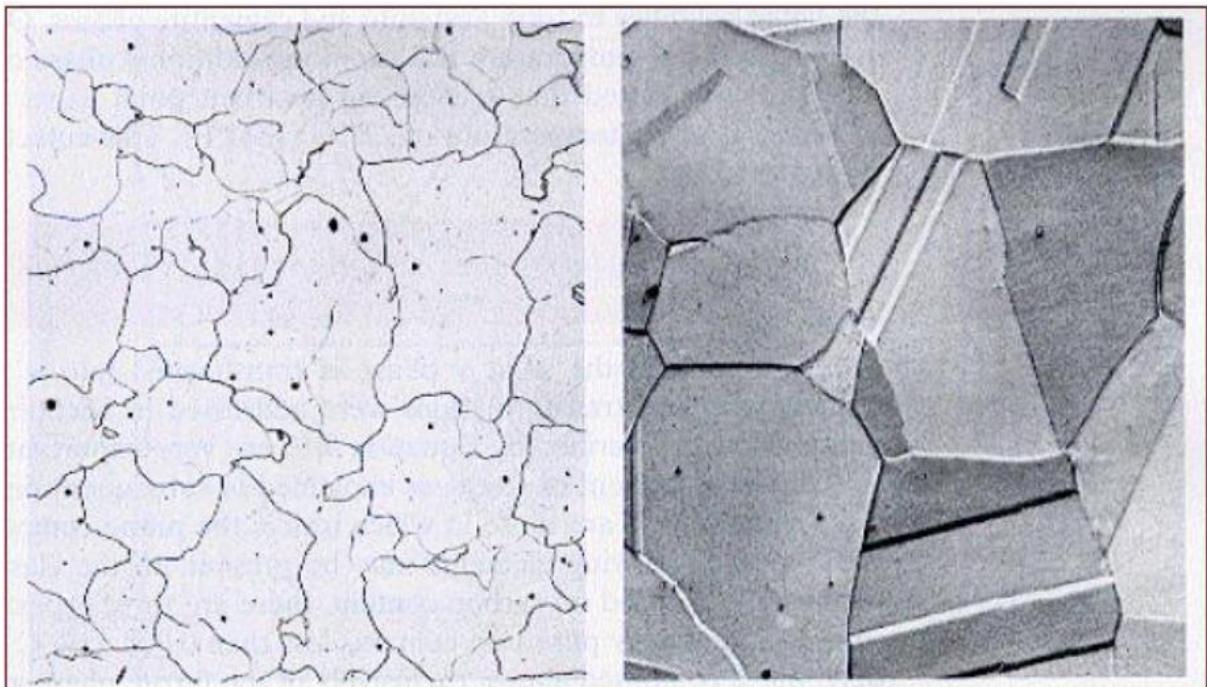


Figura 2: Macrografia Ferrita X Austenita (Apostila Materiais Uni Anchieta, Prof.Dr.Aílton Cavalli)

Cementita ( $Fe_3C$ ) se forma quando o limite de solubilidade de carbono no ferro é excedido abaixo de  $727^{\circ}C$  ou  $1341^{\circ}F$  (para composições dentro da região de fase  $\alpha + Fe_3C$ ).  $Fe_3C$  também coexistirá com a fase entre  $727^{\circ}C$  a  $1148^{\circ}C$  ( $1341^{\circ}F$  a  $2098^{\circ}F$ ). Mecanicamente a cementita é muito dura e frágil; a resistência de alguns aços é grandemente melhorada pela sua presença. Estritamente falando, cementita é apenas metaestável; isto é, ela remanescerá como um composto indefinidamente à temperatura ambiente. Mas se for aquecida até uma temperatura entre  $650^{\circ}C$  a  $700^{\circ}C$  ( $1200^{\circ}F$  a  $1300^{\circ}F$ ) por vários anos, ela irá mudar gradualmente ou transformar-se em ferro e carbono, na forma de grafita, que remanescerá no subsequente resfriamento até à temperatura ambiente. Assim o diagrama de fases não é um equilíbrio verdadeiro porque cementita não é um composto de equilíbrio. Entretanto, porquanto a decomposição da cementita é extremamente vagarosa, virtualmente todo o carbono do aço estará na forma de  $Fe_3C$  em vez de grafita e o diagrama de fase ferro-carboneto de ferro é, para todos os propósitos práticos, válido. (Callister, 1991).

## 1.2 Diagrama Fe-C de Fases em Equilíbrio

O diagrama de fase ferro-carbono conforme apresentado na Figura 3, assim como ferro puro, no aquecimento, experimenta duas mudanças em estrutura cristalina antes de se fundir. À temperatura ambiente a forma estável, chamada ferrita, ou ferro, tem uma estrutura cristalina CCC. A ferrita experimenta uma transformação polimórfica à austenita CFC, ou ferro, a  $912^{\circ}C$ . Esta austenita persiste

até 1394°C, temperatura na qual a austenita CFC se reverte de volta para a fase CCC conhecida como ferrita, que finalmente se funde a 1538°C. Todas estas mudanças são visíveis ao longo do eixo vertical esquerdo do diagrama de fases. (Callister, 1991).

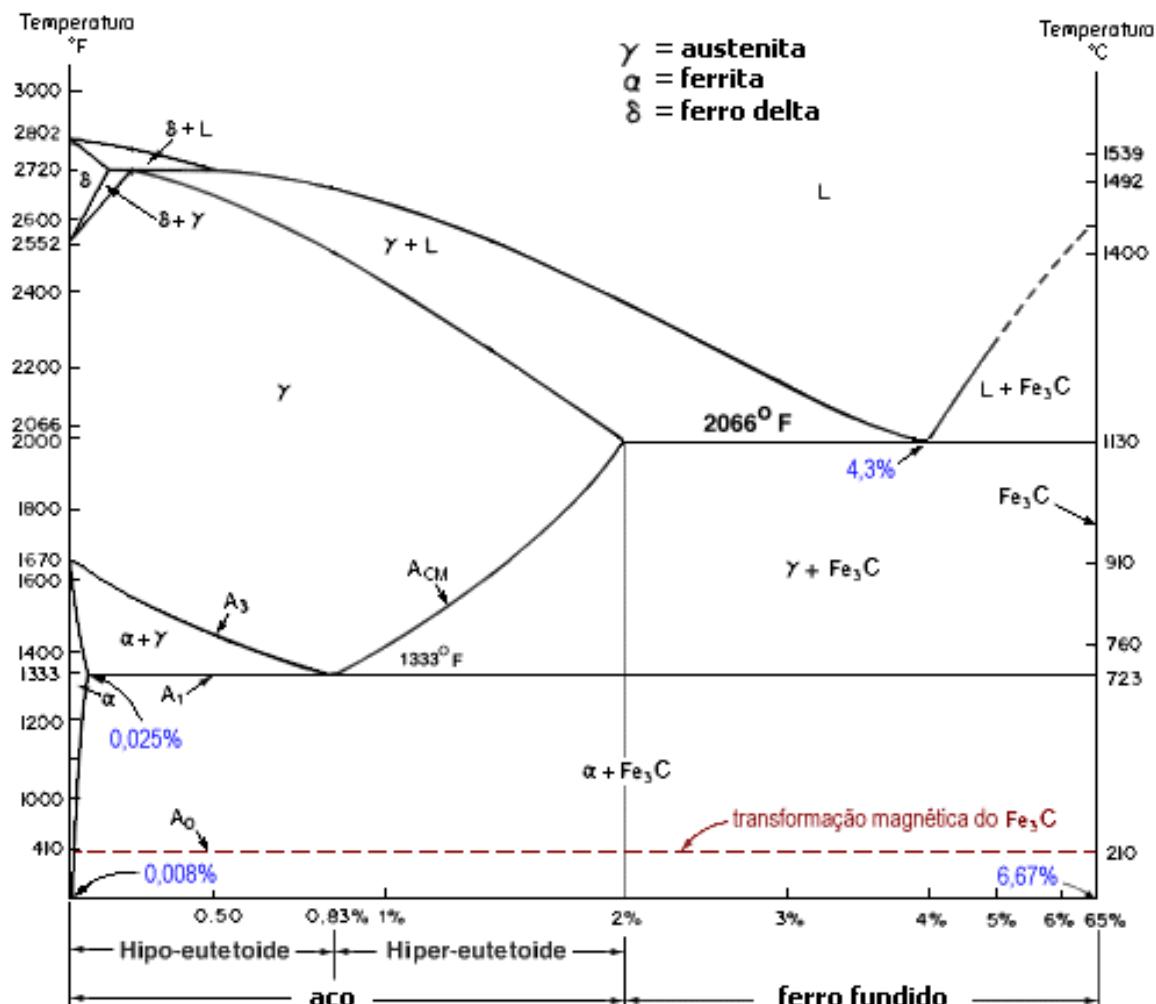


Figura 3: Diagrama de Fases em Equilíbrio (fonte: cimm.com.br).

### 1.3 Tipos De Aços

#### 1.3.1 Aços ao Carbono

Além de ferro e carbono, os aços carbono podem conter pequenas quantidades de: manganês, enxofre, fósforo, alumínio e silício. De acordo com a norma NBR 6215 pode possuir elementos de liga em teores residuais máximos de Cr = 0,20%, Ni = 0,25%, Al 0,10%, B = 0,0030%, Cu = 0,35%. A resistência mecânica do aço carbono vai de 32 a 66 kg/mm<sup>2</sup>, seu limite de escoamento está entre 17 a 28 kg/mm<sup>2</sup> e seu alongamento é de 18 a 35%. (Cavalli, 2012)

### 1.3.1.2 Efeito da Composição Química

As propriedades dos aços carbono são profundamente afetadas pelas variações de sua composição química. O aumento de carbono causa um aumento do LR (limite de resistência) do LE (limite de escoamento) e na temperabilidade (possibilidade de formação da estrutura metaestável martensita), na dureza, e diminui a ductilidade. O aumento da temperabilidade dificulta a solda devido ao endurecimento do material. (conforme Fig.4 e 5). Observe que o tratamento térmico de normalização produz um aço com maior LR e LE e menor ductilidade do que o tratamento térmico de recozimento (Figura 5). Pode-se dizer que para uma mesma composição química, as chapas grossas do aço carbono possuem menores LR e LE, pois, as chapas finas sofrem um maior numero de passe de laminação, o que contribui para melhorar a resistência mecânica. Para uma mesma especificação de LR e LE as chapas grossas de aço carbono necessitam mais carbono que as chapas finas, conforme a tabela1, Influência da quantidade de carbono na resistência do aço.

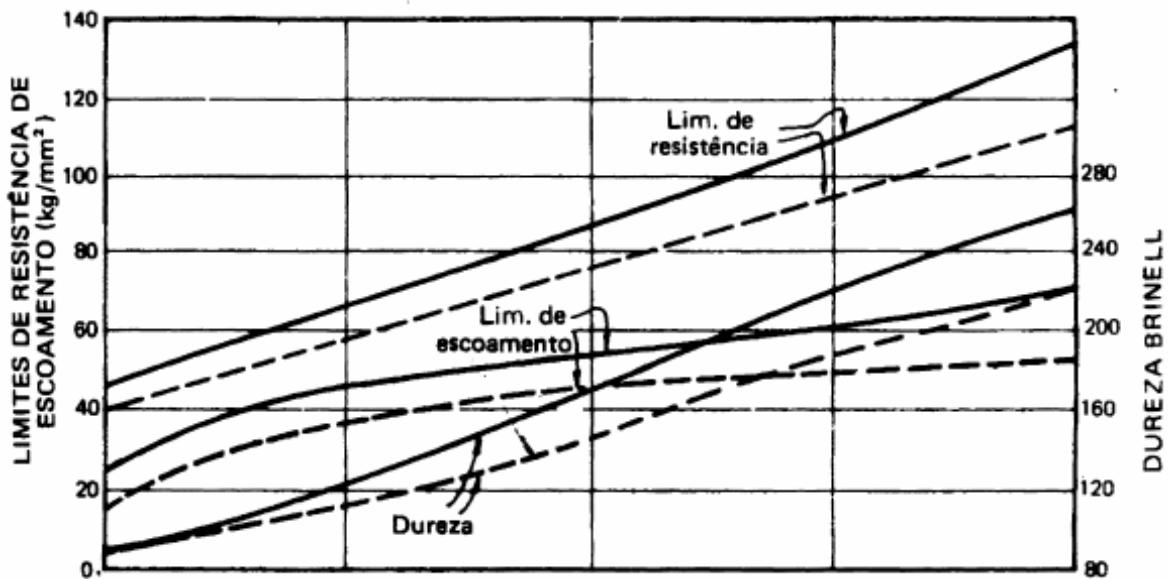


Figura 4: Gráfico Limite de Escoamento X Dureza (HB) (Fonte: Apostila Prof. Dr. Aílton).

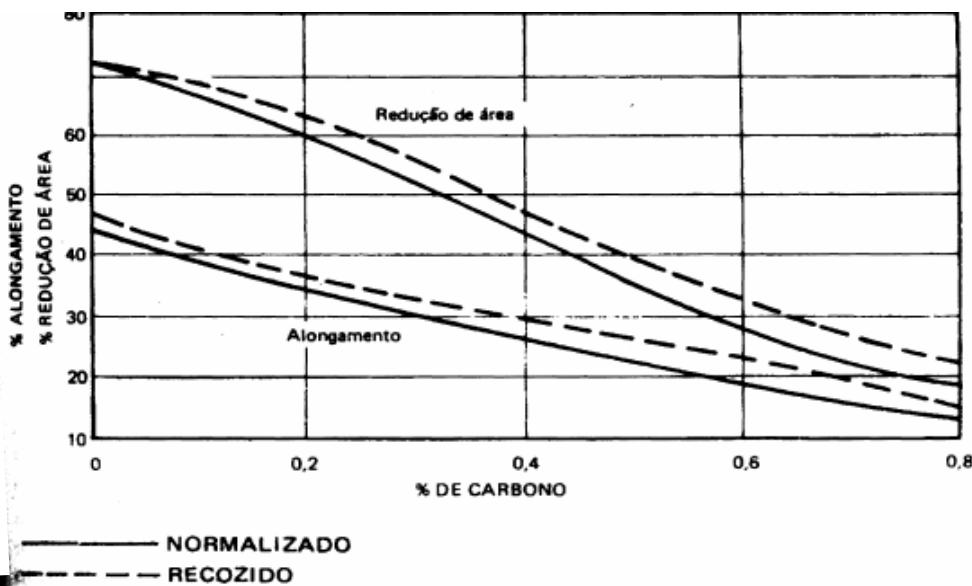


Figura 5: Gráfico % Alongamento X % de Carbono (Fonte: Apostila Prof.Dr. Aílton, Unianchieta).

Tabela 1: Limite de Resistência x Espessura da chapa

**Quantidade de carbono para um mesmo limite de resistência do aço carbono versus espessura da chapa**

Espessura	< 25mm	25mm-50mm	50mm-100mm	100mm-200mm	> 200mm
% de C	0,20%	0,22%	0,24%	0,26%	0,28%

### 1.3.1.3 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA

a) Manganês (Mg): A adição do manganês resulta num aumento da dureza do material e na resistência mecânica do aço, com menor prejuízo para a soldabilidade e para a ductilidade do aço. O maior teor de Manganês no aço carbono é de 1,6%. Ainda o Mg combate o efeito nocivo do enxofre e aumenta a tenacidade do aço, promovendo uma diminuição da transição dúctil frágil.

b) Alumínio (Al): O alumínio assim como o silício, não estão presentes em todos os aços, funcionam como desoxidantes, que se combinam com o oxigênio, removendo as bolhas de gás que se formam na solidificação do metal em fusão. Os aços totalmente desoxidados são chamados aços acalmados. Um aço semi acalmado tem uma quantidade insuficiente de Al ou Si para a desoxidação.

c) Silício (Si): é usado como desoxidante do aço. Favorece sensivelmente a resistência mecânica (limite de escoamento e de resistência) e a resistência à corrosão, reduzindo porém a soldabilidade.

d) Fósforo (P): aumenta o limite de resistência, favorece a resistência à corrosão e a dureza, prejudicando, contudo, a ductilidade e a soldabilidade. Quando ultrapassa certos teores, o fósforo torna o aço quebradiço.

e) Enxofre (S): é extremamente prejudicial aos aços. Desfavorece a ductilidade, em especial o dobramento transversal, e reduz a soldabilidade. Nos aços comuns, o teor de enxofre é limitado a valores abaixo de 0,05%.

f) Cobre (Cu): aumenta de forma sensível a resistência à corrosão atmosférica dos aços, em adições de até 0,35%. Aumenta também a resistência à fadiga, mas reduzem, de forma discreta, a ductilidade, a tenacidade e soldabilidade.

g) Níquel (Ni): O níquel aumenta a resistência mecânica, a tenacidade e resistência à corrosão. Reduz a soldabilidade.

h) Cromo (Cr): aumenta a resistência mecânica à abrasão e à corrosão atmosférica. Reduz, porém, a soldabilidade. O cromo melhora o desempenho do aço a temperaturas elevadas.

i) Nióbio (Nb): é um elemento muito interessante, quando se deseja elevada resistência mecânica e boa soldabilidade; teores baixíssimos deste elemento permitem aumentar o limite de resistência e, de forma notória, o limite de escoamento. É um componente, quase obrigatório nos aços de alta resistência e baixa liga; além de não prejudicar a soldabilidade, permite a diminuição dos teores de carbono e de manganês, melhorando, portanto, a soldabilidade e a tenacidade. Entretanto, o seu efeito sobre a ductilidade é desfavorável. (Cavalli, 2012)

j) Titânio (Ti): aumenta o limite de resistência, a resistência à abrasão e melhora o desempenho do aço a temperaturas elevadas. É utilizado também quando se pretende evitar o envelhecimento precoce.

Podemos visualizar as mudanças nas propriedades mecânicas do aço carbono devido aos teores residuais de elementos de liga na Tabela2.

Tabela 2: Influência dos elementos de liga (Fonte: Apostila Engenharia de Materiais, Uni Anchieta, Prof. Dr. Aílton Cavalli).

INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DE LIGA NAS PROPRIEDADES DOS AÇOS									
Propriedade / Elemento	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ti	Cr	Nb
Resistência Mecânica	+	+	+	-	+		+	+	+
Ductilidade	-	-		-	-	-		-	-
Tenacidade	-			-		-			+
Soldabilidade	-	-	-	-	-	-		-	
Resistência à Corrosão	-		+		+	+	+	+	
Desoxidante		+	+						

(+ ) efeito positivo;  
( - ) efeito negativo.

#### 1.3.1.4 Soldabilidade e Tratamentos Térmicos

Para os aços carbono são exigidos os seguintes tratamentos térmicos e cuidado com a solda: Pré-aquecimento a 110°C e aquecimento entre os passes, em peças com espessura superior a 12 mm, para qualquer aço e em qualquer espessura para os aços com teor de carbono acima de 0,30%. Quando a solda for em lugar de importância recomenda-se este tratamento térmico para qualquer espessura em aços com teor de carbono maior que 0,26%.

O pré-aquecimento e o aquecimento destinam-se a diminuir a velocidade de resfriamento da solda possibilitando a liberação de hidrogênio e a não formação de martensita.

Tratamentos térmicos de alívio de tensão a 600°C para os casos:

- Vasos de pressão (norma ASME, Seção VIII divisão I parágrafo UCS-56):
  1. Espessuras até 50 mm: tratamento durante 24min para cada 10 mm de espessura com no mínimo 15min.
  2. Espessura acima de 50 mm: tratamento obrigatório durante 2h acrescidos de 6min para cada 10 mm de espessura acima de 50 mm
- Tubulações (norma ASME B 31.3): tratamento obrigatório para as espessuras acima de 19 mm na proporção de 1h para cada 25 mm de espessura.
- Emprego de eletrodos de baixo hidrogênio sempre que se tenha uma ou mais das seguintes condições:
  1. Espessura igual ou maior que 25 mm.
  2. Quantidade de carbono superior a 0,22%.
  3. Limite de escoamento do aço acima de 35 mm.
  4. Radiografia total das soldas importantes em partes com espessuras superiores a 30 mm.

Como a soldabilidade e a temperabilidade do aço carbono são muito influenciadas pela quantidade de carbono, adota-se na prática um índice denominado equivalente de carbono que é dado pela seguinte equação:

$$\text{equivalente de } C = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Para os aços com pequena quantidade de carbono (até 0,25%, aproximadamente) a soldabilidade é função principalmente do equivalente de carbono, sendo a soldagem tanto mais difícil quanto maior for esse índice. Recomenda-se que o equivalente de carbono seja sempre menor que 0,45. Para aços com mais que 0,25% de carbono o fator predominante para a soldabilidade é a própria percentagem de carbono.

#### 1.3.1.5 Efeitos das Temperaturas nos Aços

De um modo geral pode-se dizer que o aumento da temperatura faz diminuir o limite de resistência dos materiais metálicos assim com seus limites de escoamento, dureza e o módulo de elasticidade. (conforme o Figura 6). A variação do limite de escoamento e de dureza acompanha, aproximadamente o limite de resistência do material. Devido à diminuição do LR com o aumento de temperatura, todos os materiais têm uma temperatura limite de emprego, acima da qual sua resistência está tão baixa que obriga a adotar espessuras muito grandes.

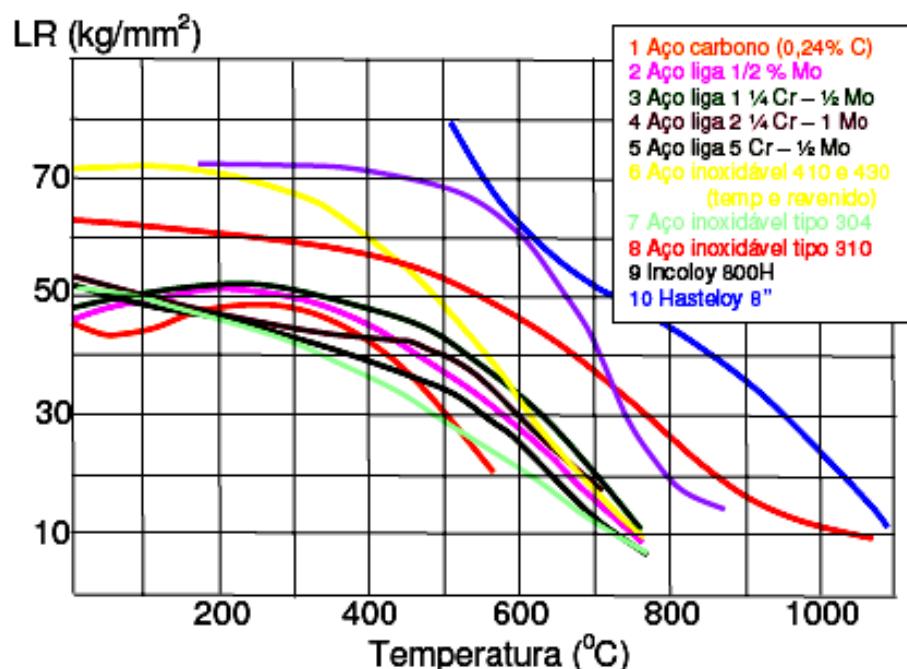


Figura 6: Gráfico Limite de Resistência X Temperatura (Uni Anchieta, Apostila de Engenharia de Materiais, Prof.Dr. Aílton Cavalli).

Pode-se observar que o máximo do limite de resistência para o aço carbono é alcançada na temperatura de 250°C. Vale lembrar que a curva do limite de resistência versus temperatura depende da qualidade do aço, do processo de fabricação e dos tratamentos térmicos. Acima de 400°C, o limite de resistência diminui rapidamente com o aumento de temperatura. As deformações por fluência iniciam-se na temperatura de 370°C. A temperatura de formação de carepa para aços carbono expostos ao ar é 540 °C e a água é de 430°C. Para meios altamente oxidantes a temperatura de formação de carepa pode ser muito menor. A utilização prolongada do aço em temperaturas superiores a 420°C pode causar a corrosão seletiva denominada grafitização, que é a decomposição da cementita (carboneto de ferro  $Fe_3C$ ) e liberação de carbono livre na forma de grafite. Para temperaturas acima de 400°C recomenda-se a utilização de aços totalmente acalmados (desoxidados). A desoxidação deve ser feita com o silício por este promover o aparecimento de grãos grossos em contrapartida do alumínio que diminui o tamanho dos grãos e favorece a grafitização.

Recomendam-se os seguintes máximos de temperatura para os serviços com aços-carbono totalmente acalmados:

- 450 °C: para as partes principais sujeitas a esforços no serviço contínuo;
- 480°C: para partes secundárias no serviço contínuo;
- 520°C: para peças sem grandes esforços e em curtos períodos.

#### 1.3.1.6 Efeito das Baixas Temperaturas nos Aços Carbono

Por os aços carbonos apresentarem uma estrutura metalúrgica cúbica de corpo centrado, esses apresentam a transição dúctil-frágil em baixas temperaturas. O aumento da concentração de carbono influencia a transição dúctil-frágil aumentando a faixa de transição como pode ser observado na Figura 7. Para serviços em baixa temperatura recomenda-se a utilização do manganês até a concentração de 1,6% em peso, pois este desloca a curva de transição dúctil-frágil para menores temperaturas como pode-se observar na Figura 8. A desoxidação também desloca a curva de transição dúctil-frágil para menores temperaturas sendo preferencial realizada com alumínio por este promover a diminuição dos grãos da estrutura metalúrgica.

De forma geral é recomendado os seguintes cuidados com aços carbono em trabalhos a baixas temperaturas:

- Menores que -45°C: mesmo de curta duração, não utilizar aço carbono.

- De -45 °C a 0°C exigência de aços de baixo carbono, alto manganês, grãos finos, normalizados e submetidos a testes de impacto.
- De 0°C a 15°C emprego de aços de grãos finos e submetidos a teste de impacto, pelo menos para peças com espessura maiores de 12 mm.
- Maiores de 15°C teste de impacto para espessuras maiores que 50 mm.

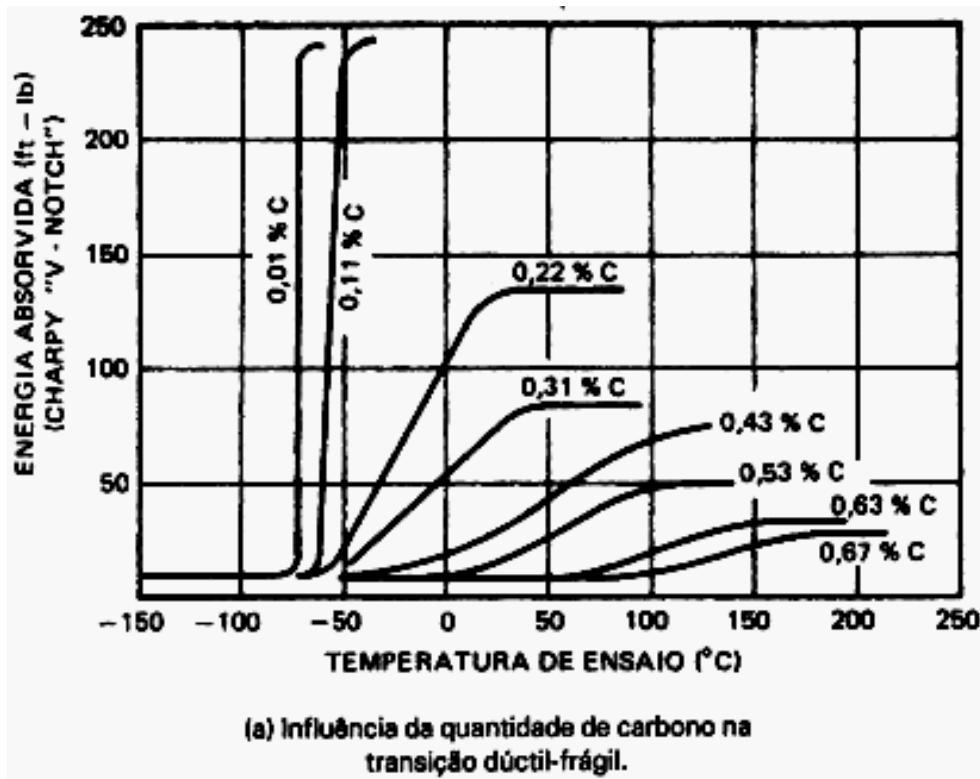


Figura 7: Energia absorvida X Temperatura Ensaio (Apostila de Engenharia de materiais Prof. Dr. Álton Cavalli). (Callister, 1991)

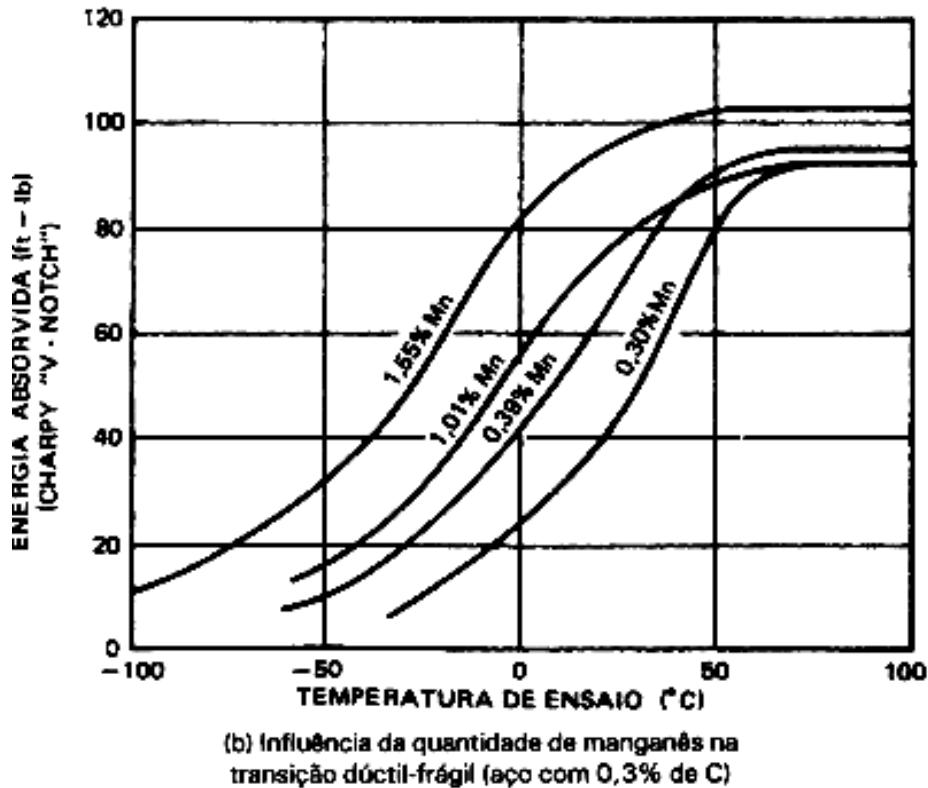


Figura 8: Gráfico-Energia absorvida X Quantidade de Mn. (Apostila de materiais Uni Anchieta, Prof. Dr. Aílton Cavalli )(Callister,1991).

### 1.3.1.7 Corrosão nos Aços Carbonos.

Como o ferro é um metal próximo da extremidade anódica da série galvânica, dificilmente haverá algum caso que o aço carbono não seja corroído. O aço carbono só apresenta boa resistência à corrosão quando:

- meio é fortemente alcalino sem tensão;
- meio neutros desaerados;
- em meios de total ausência de água ou umidade .

O contato com a atmosfera ou qualquer outro meio contendo oxigênio, água ou umidade, produz no aço carbono uma forma de corrosão uniforme generalizada, conhecida como FERRUGEM. A ferrugem normalmente não passiva o aço, porque a camada de óxidos é altamente porosa e não impede o prosseguimento da corrosão. Em atmosferas não poluídas e com umidade inferior a 60%, pode-se admitir que o progresso da ferrugem seja muito lento para a temperatura ambiente. Em geral, é obrigatório o uso de revestimento anticorrosão ou pintura em peças de aço carbono que esteja, em contato com a atmosfera. A adição de pequenas quantidades de elementos de liga, tais como: Cromo, cobre, nióbio ou níquel, melhoram sensivelmente a resistência do aço à corrosão atmosférica, criando aços que dispensam pintura, denominados “aços patináveis”. Esses aços desenvolvem uma camada de

óxido muito aderente e protetora que serve como revestimento. O contato (do aço com o solo) pode resultar em um grave processo de corrosão uniforme e corrosão por pites perfurante. Por esse motivo é obrigatório que haja um revestimento protetor em qualquer peça de aço carbono enterrada ou em contato com o solo. Para água doce, a corrosão é desprezível, desde que não existam minerais ou gases dissolvidos, e o PH seja superior a 8. Os cloretos e sulfetos são bastante agressivos, principalmente os cloretos oxidantes (férrico, cúprico etc.). Acima do PH 11 geralmente ocorre a passivação do aço. Para águas salgada ou salobra, o aço carbono é inaceitável em qualquer caso devido à severa corrosão por pites e corrosão generalizada, assim nesses casos exige-se a utilização de revestimentos anticorrosivos ou pintura, ou ainda proteção catódica. O aço carbono pode ser empregado com vapor da água, até as temperaturas indicadas no item 1.3.1.5, sendo a corrosão bastante baixa desde que haja um tratamento adequado da água de alimentação da caldeira. O condensado proveniente do vapor pode ser muito corrosivo para o aço carbono, quando há presença de dióxido de carbono e formação de ácido carbônico.

### 1.3.2 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são aços liga de ferro-cromo que contêm, tipicamente, um teor mínimo de 12% de cromo. A formação de uma fina camada de óxido de cromo em sua superfície confere a estes materiais uma resistência à corrosão elevada, em especial à corrosão atmosférica. Estes aços são empregados onde há exigência de resistência em certos meios agressivos, sem comprometer a sua superfície, mantendo-se ainda as suas propriedades estruturais. A sua utilização expandiu-se consideravelmente no mundo moderno.

A película passivadora de óxidos de cromo, que é resistente e uniforme, tem excelente aderência e plasticidade, volatilidade e solubilidade praticamente nulas. O grau de inoxidabilidade do aço depende da estabilidade dessa película, que tem uma espessura média de  $0,02\mu\text{m}$ . Os casos gerais de emprego do aço inoxidável são os mesmos que dos aços liga. Existe uma grande variedade de tipos de aços inoxidáveis; só a ASTM define mais de 80 tipos diferentes.

Os tipos convencionais mais antigos costumam serem classificados em três grupos, de acordo com a estrutura metalúrgica predominante da liga, em temperatura ambiente:

- AUSTENÍTICOS
- FERRÍTICOS
- MARTENSÍTICOS

Entre os três grupos, os aços austeníticos são os mais importantes por apresentarem maior resistência à corrosão, contudo apresentam um custo médio maior que os outros dois grupos. É impossível identificar a olho nu os aços inoxidáveis, contudo as diferenças de potencial entre quaisquer tipos de aços inoxidáveis são desprezíveis, não havendo, portanto, problemas de corrosão galvânica pelo contato mútuo. Apesar de sua excelente resistência à corrosão, principalmente à corrosão atmosférica, devido à formação da camada passivadora de óxido de cromo. Todos os aços inoxidáveis estão sujeitos à corrosão por pites e corrosão em frestas nos meios que a passivação é rompida ou não se forma completamente. A resistência à corrosão desses aços depende bastante do estado de acabamento da superfície do metal. Os aços inoxidáveis estão, também, sujeitos à corrosão e erosão para velocidade relativa de vazão alta, recomendando-se que a velocidade máxima fique abaixo de 3m/s.

#### 1.3.2.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

A austenita é uma solução sólida de carbono no ferro gama ( $\gamma$ ), a Figura 9 apresenta a estrutura metalúrgica da mesma, cristalizando-se no sistema cúbico de faces centradas, sendo o aço não magnético. Devido à retenção de uma forma metaestável da austenita à temperatura ambiente, os aços desse grupo são denominados austeníticos. Apresenta excelente soldabilidade e maior resistência à corrosão em relação aos aços dos demais grupos. Combinam o baixo limite de escoamento com o alto limite de resistência e bom alongamento, oferecendo as melhores propriedades para o trabalho a frio.



Figura 9: Estrutura Metalúrgica de um aço inoxidável austenítico.  
(Prof. Dr. Aílton Cavalli, Apostila Uni Anchieta, Materiais).

Existe uma variedade muito grande de aços inoxidáveis austeníticos. Os aços convencionais são classificados pelo AISI (*American Iron and Steel Institute*) em dois grupos, denominados: série 300 e

série 200. A série 300, que é a mais importante abrange aços com 16 – 25% de cromo e 7 – 22% de níquel, tendo, ainda, algumas pequenas quantidades de liga. Nos aços da série 200, o níquel é parcialmente substituído pelo manganês, tendo esta série até 6% de Ni e até 15% de Mn.

De todos os aços austeníticos, o tipo 304 (vulgarmente 18-8) é o mais empregado na prática, por ser uma ótima combinação de excelente resistência à corrosão e custo não muito elevado, cabendo, por isso, a esse tipo de aço, cerca de 50% de todas as aplicações de aços inoxidáveis em geral. É o material normalmente empregado na indústria alimentícia e farmacêutica.

Os aços contendo molibdênio (tipo 316 – 317) têm melhor resistência à fluência e melhor resistência à corrosão (principalmente em meios ácidos) do que os outros aços austeníticos, sendo, porém, de custo bem mais elevado. A adição de molibdênio desestabiliza a forma austenita do aço, para estabilizá-la é necessário aumentar a quantidade de níquel no aço. O molibdênio é um forte formador de ferrita. Podem-se dividir os aços inoxidáveis austeníticos em relação à quantidade de carbono, são eles:

- Aços carbono normal (até 0,8%), cujo valor mínimo de LR é 53 kg/mm<sup>3</sup>. São exemplos de aço inoxidável de carbono normal os tipos 304, 310, 316, 321 e 347 entre outros;
- Aços de baixo carbono (até 0,03%) resistência mecânica menor que o anterior, mas uma maior resistência à corrosão. Tipos 304L, 316L, 304ELC e 316ELC.
- Aços de carbono controlado (entre 0,04% e 0,10%) são submetidos a tratamento térmico para obtenção de granulação grossa, o que melhora a resistência à fluência.
- Aços com nitrogênio. A adição de nitrogênio (até 0,2%) melhora até em 15% o limite de resistência do material e em até 40% o limite de escoamento do aço, ainda ajuda na estabilização da forma austenita do aço. São denominados aços tipo N, alguns exemplos são o 304N e o 316N.

A estrutura CFC do ferro  $\gamma$  apresenta melhor resistência à fluência do que a estrutura CCC do ferro  $\alpha$ , por isso, os aços austeníticos têm grande resistência à fluência. Podem-se observar, na figura, as curvas de tensão para a ruptura por fluência de vários tipos de aços inoxidáveis e do aço carbono que serve de referência.. Podem-se observar na Figura 10 que, entre os aços austeníticos os que apresentam melhor resistência à fluência são os aços tipo 316 e 317, os quais contem molibdênio e também os tipos estabilizados 321, 347 e 248.

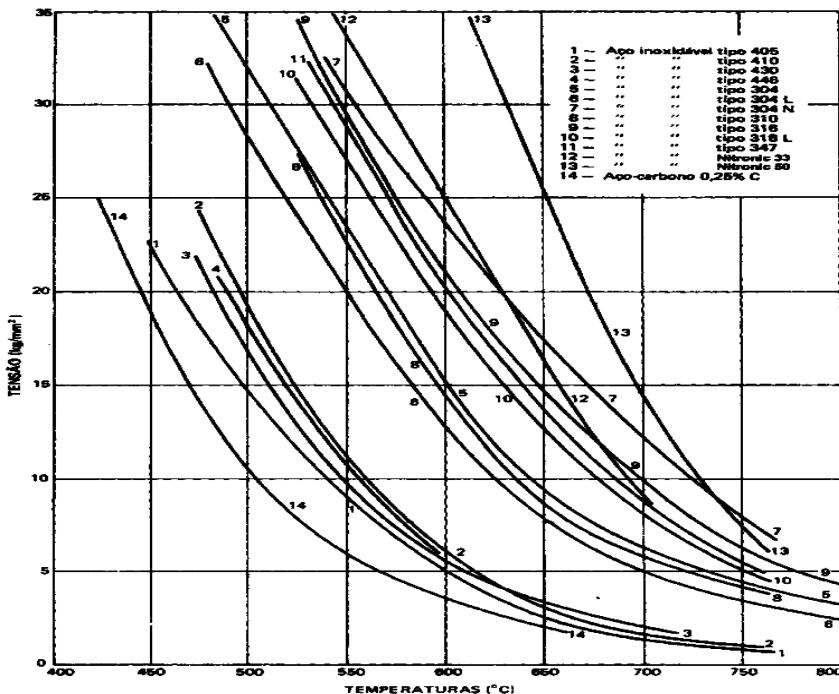


Figura 10: Gráfico- Tensão X Temperatura para aços (Metals hand book).

Todos os aços inoxidáveis austeníticos apresentam grande resistência à fadiga. Os aços austeníticos são mais fáceis de deformação a frio (curvar, dobrar etc.) que os demais aços inoxidáveis.

A estrutura austenítica (como outros metais de cristalização CFC) não apresenta temperatura de transição dúctil-frágil, sendo, assim, teoricamente imune às fraturas frágeis. Na prática admitem-se as seguintes temperaturas mínimas para o emprego desses aços:

**TIPO 316, 317, 321 e todos da série 200:** -195°C.

**TIPO 304, 310, 347 e 348:** -255°C

**TIPO 304L e 304 ELC:** Sem Limites

#### 1.3.2.1.1 Corrosão em Geral (Austeníticos)

Em temperaturas ambientes ou moderadas, esses aços são completamente inertes em relação à água doce, atmosfera em geral vapor da água e outros meios de baixa corrosão. São também praticamente inalteráveis no contato com muitos meios pouco corrosivos, como, por exemplo: óleos vegetais, produtos alimentares e farmacêuticos em geral, bem como soluções salinas neutras ou alcalinas, principalmente quando de sais oxidantes. Para todos esses serviços, os aços tipos 310 316 e

317 são sensivelmente melhores que os demais. Os aços austeníticos têm grande resistência à oxidação em temperaturas elevadas. E grande resistência aos hidrocarbonetos em temperaturas elevadas, mesmo quando há a presença de compostos sulfurosos. Os aços austeníticos podem ainda ser empregados, entre outros, para os seguintes serviços mostrados na tabela 3:

Tabela 3: Aços Austeníticos e suas Aplicações

Serviço	Tipo	Temperatura	Concentração do composto	Taxa de corrosão	observação
Ácido nítrico	304L	Ambiente	95%	1mm/ano	304 e 316 Sujeitos a corrosão intergranular
	304L	140°C	5%		
Ácido sulfúrico	316L	Ambiente	>85% ou <10%	3mm/ano	304 e 316 Sujeitos a corrosão intergranular
Ácido fosfórico	316L	Até 100°C	Até 40%	0,3mm/ano	304 e 316 Sujeitos a corrosão intergranular
	316L	Ambiente	Qualquer		
Soda cáustica	304	Até 100°C	Até 60%	0,2mm/ano	Possibilidade de corrosão sob tensão
Amônia	Qualquer	Até 400°C	Qualquer	Desprezível	
Enxofre	Qualquer	Qualquer	Qualquer	Desprezível	Totalmente seco
Cloro	Qualquer	Até 350°C	qualquer	Desprezível	Totalmente seco

Chama-se de sensitização dos aços inoxidáveis à formação de carbonetos complexos de cromo, devido à combinação do cromo com o carbono livre resultante da decomposição da cementita ( $Fe_3C$ ). Nos aços austeníticos a sensitização ocorre entre as temperaturas de 450°C a 850°C. O aço quando sensitizado fica sujeito à corrosão intergranular, a qual acontece principalmente nos meios ácidos. A sensitização é tanto mais intensa e tanto mais rápida quanto maior for a quantidade de carbono no aço, ou quanto mais tempo o metal ficar na temperatura crítica. A sensitização não é um fenômeno enxergado a olho nu.

Há duas possibilidades de diminuir o risco de sensitização dos aços inoxidáveis:

Adição de pequenas quantidades dos chamados elementos estabilizadores (Ti, Nb, Ta) produzindo os aços denominados estabilizados tipos 321, 347 e 348 Redução na quantidade de carbono, produzindo os aços de baixo de extra-baixo carbono tipo L e ELC. Contudo, nenhum método é totalmente garantido para o controle da sensitização. Veja na tabela 4 uma comparação dos aços estabilizados e dos aços de baixo carbono.

Tabela 4: Aços Estabilizados X Aços ao Carbono

Aços estabilizados	Aços de baixo carbono
Maior resistência mecânica	Menor resistência mecânica
Menor resistência à corrosão	Maior resistência à corrosão
Alguns sujeitos a corrosão de fio de faca	Sujeitos a sensitização pela exposição prolongada acima de 450°C Maior tenacidade e resistência à fadiga

Sob o aspecto geral da corrosão, o grande problema dos aços inoxidáveis austeníticos é a possibilidade de corrosão sobtentão e de corrosão por pites a que estão sujeitos, quando em contato com os meios halogêneos de um modo geral (íons Cl, F, Br, I) que tem a propriedade de conseguir romper a camada passivadora desses aços em alguns pontos. Desses meios corrosivos, os cloretos, água salgada, ácido clorídrico; são os mais importantes, pelo fato de serem os mais agressivos e mais comuns na prática.

#### 1.3.2.2 Aços Inoxidáveis Ferríticos e Martensíticos

Esses aços inoxidáveis têm, dependendo do tipo de 12 a 30% de Cr; a maior parte é isenta de Ni, tendo alguns, pequenas quantidades desse metal. São todos aços magnéticos. Os aços ferríticos apresentam Ferro alfa (Fe  $\alpha$ ) em qualquer temperatura, não possuem transição Fe $\alpha$ - Fe $\gamma$ , por isso não temperam qualquer que seja o tratamento térmico, podendo, entretanto, endurecer quando submetida à deformação a frio. Os aços martensíticos apresentam tal como os aços carbono, Fe $\alpha$  abaixo da temperatura de transformação e Fe  $\gamma$  acima dessa temperatura; são, portanto, capazes de temperar, assim, como os aços carbono, podendo alcançar elevados valores de dureza e limite de resistência (até aproximadamente 190 kg/mm<sup>2</sup>). Existem ainda os aços inoxidáveis de estrutura mista ferrítica-martensítica, que são capazes de tempera parcial.

A Tabela 5 mostra os principais tipos de aços desses grupos, com a designação numérica da AISI:

Tabela 5: Principais Designações Ferríticas e Martensíticas AISI (Fonte: Norma AISI)

Designação AISI	Estrutura metalúrgica	Composição nominal (%) Restante: ferro	Limites de comprimensão (°C)		Tensões admisíveis (kg/mm <sup>2</sup> ) (Norma AISI Seção VIII, Divisão 1)					
			Nominais	Resistência mecânica nominal aproximada	40°C	260°C	345°C	430°C	540°C	650°C
403	Martensítico	0,15 C; 1,0 Mn; 0,5 Si 11,5 a 13 Cr		480						
406	Ferrítico	0,08 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 11,5 a 14,5 Cr; 0,6 Ni; 0,1 a 0,3 Al	540	480	11,56	9,18	8,86	7,82	2,81	
410	Martensítico	0,18 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 11,5 a 13,5 Cr; 0,75 Ni	650	500	11,56	9,78	9,35	8,44	4,50	0,70
410S	Ferrítico	0,08 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 11,5 a 13,5 Cr; 0,6 Ni	650	480	11,56	9,18	8,55	7,52	4,50	0,70
416	Martensítico	0,18 C; 1,0 Mn; 0,8 Si 12 a 14 Cr; 0,8 Mo		480						
420	Martensítico	0,16 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 12 a 14 Cr		480						
428	Martensítico*	0,12 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 14 a 16 Cr; 0,75 Ni	650	500	11,46	9,78	9,35	8,44	4,67	1,28
430	Ferrítico	0,12 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 16 a 18 Cr; 0,75 Ni	370	550	12,30	11,56	10,04			
431	Martensítico*	0,20 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 16 a 17 Cr; 1,5 Ni		600						
440	Martensítico	0,80 C; 1,0 Mn; 1,0 Si 21,6 a 18 Cr; 0,75 Mo		600						
442	Ferrítico	0,20 C 18 a 23 Cr		650						
446	Ferrítico	0,38 C 23 a 27 Cr	370	650	12,30	11,56	10,04			

\* Os aços tipos 428 e 431 são, na realidade, mistos martensítico-ferríticos.

Nota: As percentagens de C, Mn, Si e Ni são máximas.

A resistência mecânica em temperaturas elevadas e a resistência à fluência desses aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos são comparáveis com as resistências dos aços de baixa liga, sendo a resistência à fluência sensivelmente inferior a dos aços inoxidáveis austeníticos. Por esse motivo, as temperaturas máximas limites de uso prático são também inferiores às dos aços austeníticos, com pode ser observado na Tabela 5. Os aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos estão sujeitos à corrosão por pites em presença de halogênios, em meio aquoso, principalmente do íon cloreto, embora esse fenômeno seja bem menos intenso e menos frequente do que nos austeníticos. Os aços martensíticos estão sujeitos a corrosão sobtensão com os halogênios, e a fragilização pelo hidrogênio. Os aços ferríticos são imunes a essa fragilização e dificilmente sofrem corrosão sobtensão com os halogênios. Os aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos são da série 400.

A Tabela 6. Mostra um resumo das principais características dos principais aços inoxidáveis.

Tabela 6: Principais Aços Inoxidáveis e suas características (Fonte: Norma AISI).

Estárvore Metalúrgicas	Tipo ou nome	Límite de resistência (mínimo) em temp. ambiente (kg/mm <sup>2</sup> )	Fadiga Tensão para ruptura em 1.000 horas a 650°C (kg/mm <sup>2</sup> )	Temperatura-Resist. (°C)				Possibilidade de:					Custo relativo aproximado (%)	Observações	
				Oxidação se se	Resistência a corrosão atmosférica	Máximas	Solda-Máximas	Resist. à tração	Fiss. sigma	Fragilidade a 475°C	Corrosão sob tensão em presença de clorato	Corrosão por píres com clorato			
Austeníticos	304	53	10,1	900	600	-225	↑	Sim	↑	↑	↑	↑	↑	1,00	1
	304 L	49	8,4	900	400	-270	↑	Não	↑	↑	↑	↑	↑	1,20	2
	304 H	53		900	600	-	↑	Sim	↑	↑	↑	↑	↑	2,0	3
	310	53	8,4	1.100	650	-	↑	Sim	↑	↑	↑	↑	↑	2,20	3,4
	316	53	16,8	900	650	-195	↑	Sim	↑	↑	↑	↑	↑	1,60	
	316 L	49	14,0	900	400	-195	↑	Não	↑	↑	↑	↑	↑	Pouco	
	318 H	53		900	650	Muito	↑	Sim	Diffic	↑	↑	↑	↑	Pouco	
	317	53		900	650	-195	↑	Sim	(longo tempo)	↑	↑	↑	↑	Pouco	
	321	53	12,8	900	650	-185	↑	Não	↑	↑	↑	↑	↑	Sim	4
	347	53	15,0	900	600	-255	↑	Não	↑	↑	↑	↑	↑	Sim	1,45
	20-Cr-3	53		900	650	-255	↑	Sim	↑	↑	↑	↑	↑	Pouco	6,00
	2 R R 66	53		900	650	-270	↑	Não	↑	↑	↑	↑	↑	Muito pouco	3,20
	2 R R 86	53		950	650	-270	↑	Não	↑	↑	↑	↑	↑	Muito pouco	5,8
	308-18-18-2	53		1.100	650	-255	↑	Sim	↑	↑	↑	↑	↑	Pouco	5
Austeníticos Cr-Mn-Ni	276	51		850		↑	↑	Sim	↑	↑	↑	↑	↑	Muito pouco	
	Nicrosta 38	77	17,2	850	650	-195	↑	Sim	Diffic	↑	↑	↑	↑	Sim	
	Nicrosta 40	70		850	650	Muito	↑	Sim	(longo tempo)	↑	↑	↑	↑	Sim	
	Nicrosta 50	84	28,1	850	700	Baixa	↑	Não	↑	↑	↑	↑	↑	Muito pouco	
	Nicrosta 60	72		850	700	↓	↓	Não	↓	↓	↓	↓	↓	Sim	

(\*) Custo do aço inoxidável austenítico tipo 304: 1,00. Veja observações na pág. 156.

Observações

Estárvore Metalúrgicas	Tipo ou nome	Límite de resistência (mínimo) em temp. ambiente (kg/mm <sup>2</sup> )	Fadiga Tensão para ruptura em 1.000 horas a 650°C (kg/mm <sup>2</sup> )	Temperatura-Resist. (°C)				Possibilidade de:					Custo relativo aproximado (%)	Observações	
				Oxidação se se	Resistência a corrosão atmosférica	Máximas	Solda-Máximas	Resist. à tração	Fiss. sigma	Fragilidade a 475°C	Corrosão sob tensão em presença de clorato	Corrosão por píres com clorato			
Ferritas	405	42	2,8	750	450	↑	Diffic	↑	Não	↑	↑	↑	↑	0,85	1
	410 S	42		700	450	Zero	↑	Sim	↑	↑	↑	↑	↑	0,85	
	430	46	3,8	850	550	Zero	↑	Sim	↑	↑	↑	↑	↑	1,00	
	440	49	3,2	1.100	550	↓	↓	Sim	↓	↓	↓	↓	↓	1,20	3,4
	XRA-27	48		1.100		Baixa	↓	Sim	↓	↓	↓	↓	↓	4,8	
	3 RE 60	65		850		Zero	Boa							8,2	
Ferritas- Láminas	HTK-94	77		1.100	400	Zero	Boa							4,8, 8	
	410	180	2,4	700	500	↑	↑	↑	Não	↑	↑	↑	↑	0,75	1, 10, 11, 1
	416	180		700	480	↑	↑	↑	Não	↑	↑	↑	↑	11, 13	
	429	180		850	500	Zero	Diffic	Não	Não	↑	↑	↑	↑	11, 13	
	431	180		800	500	↓	↓	↓	Não	↓	↓	↓	↓	11, 13	
Austeníticos para processos	440	180		850	500	↓	↓	↓	Não	↓	↓	↓	↓	10, 11, 13	
	17-4-PH	95		750		↑								12	
	17-H-PH	61		750		Zero								12	
	PH-13-8-Mo	91		700										12	
	Custom 450	95		700										12	
	Custom 455	108		700										12	

(\*) Custo do aço inoxidável austenítico tipo 304: 1,00.

Observações:

1. Aços inoxidáveis mais econômicos.
2. Aços especiais para óxido nítrico.
3. Aços especiais para temperaturas muito elevadas.
4. Aços especiais para serviços altamente oxidantes.
5. Aços para serviços de alta corrosão.

6. Aços sujeitos à corrosão iniciada nas soldas.
7. Aços especiais para óxido sulfídico.
8. Aços especiais para águas salgadas.
9. Aços só encontrados no comércio em forma de tubos, bolas e chapas finas.

10. Aços para partes internas de válvulas.
11. Aços temperíveis.
12. Aços para peças pequenas muito tensionadas.
13. Para os aços inoxidáveis os limites de resistência são no sentido longitudinal.

A Tabela 7. Trás as principais especificações comerciais para os aços inoxidáveis empregados em equipamentos de processo. As designações numéricas referem-se a especificações da ZAT.

Tabela 7: Especificações comerciais para Aços Inox ZAT (Fonte : Norma ZAT).

Classe de material (designação AISI)	Chapas	Formas de apresentação						
		Tubos para condução		Tubos para troca de calor		Peças forjadas	Peças fundidas	Acessórios de tubulação
		sem costura	com costura	sem costura	com costura			
Tipo 304	A-240 Gr 304	A-312 Gr 304	A-358 Gr 304	A-213 Gr 304	A-249 Gr 304	A-182F 304	A-351 CF 8	A-403WP 304
Tipo 304H	A-240 Gr 304H	A-312 Gr 304H	A-358 Gr 304H	A-213 Gr 304H	A-249 Gr 304H	A-182F 304H		A-403WP 304H
Tipo 304L	A-240 Gr 304L	O-312 Gr 304L	A-358 Gr 304L	A-213 Gr 304L	A-249 Gr 304L	A-182F 304L	A-351 CF3	A-403WP 304L
Tipo 304N	A-240 Gr 304N	A-312 Gr 304N	A-358 Gr 304N	A-213 Gr 304N	A-249 Gr 304N	A-182F 304N		A-403WP 304N
Tipo 310	A-240 Gr 310	A-312 Gr 310	A-358 Gr 310	A-213 Gr 310	A-249 Gr 310	A-182F 310	A-351 CK20	A-403WP 310
Tipo 316	A-240 Gr 316	A-312 Gr 316	A-358 Gr 316	A-213 Gr 316	A-249 Gr 316	A-182F 316	A-351CF 8M	A-403WP 316
Tipo 316H	A-240 Gr 316H	A-312 Gr 316H	A-358 Gr 316H	A-213 Gr 3316H	A-249 Gr 316H	A-182F 316H		A-403WP 316H
Tipo 316L	A-240 Gr 316KL	A-312 Gr 316L	A-358 Gr 316L	A-213 Gr 316L	A-249 Gr 316L	A-182F 316L	A-351CF 3M	A-403WP 316L
Tipo 316N	A-240 Gr 316N	A-312 Gr 316N	A-358 Gr 316N	A-213 Gr 316N	A-249 Gr 316N	A-182F 316N		A-403WP 316N
Tipo 317	A-240 Gr 317	A-312 Gr 317	A-358 Gr 317		A-249 Gr 317			A-403WP 317
Tipo 321	A-240 Gr 321	A-312 Gr 321	A-358 Gr 321	A-213 Gr 321	A-249 Gr 321	A-182F 321		A-403WP 321
Tipo 347	A-240 Gr 347	A-312 Gr 347	A-358 Gr 347	A-213 Gr 347	A-249 Gr 347	A-182F 347	A-351CF 8C	A-403WP 347
Tipo 348	A-240 Gr 348	A-312 Gr 348	A-358 Gr 348	A-213 Gr 348	A-249 Gr 348	A-182F 348	A-341 10MC	A-403WP 348
Tipo 405	A-240 Gr 405			A-268 Gr 405				
Tipo 410	A-240 Gr 410			A-268 Gr 410		A-182F 6a		
Tipo 410S	A-240 Gr 410S							
Tipo 429	A-240 Gr 429			A-268 Gr 429		A-182F 429		
Tipo 430	A-240 Gr 430			A-268 Gr 430		A-182F 430		
Tipo 446				A-268 Gr 446				

### 1.3.2.2.1 Aços Inoxidáveis Ferríticos

São os aços correspondentes à fase ferrítica, que é uma solução sólida de carbono no ferro alfa ( $\alpha$ ), cristalizando-se no sistema cúbico de corpo centrado. Não são endurecíveis por tratamento térmico e basicamente, são usados no estado recocido, com uma estrutura formada por uma matriz ferrítica com carbonetos globulares do cromo. Apresentam melhor trabalhabilidade e resistência à corrosão que aços martensíticos. Possuem boas propriedades físicas e mecânicas, são magnéticos e resistentes à corrosão atmosférica e a certos meios agressivos, principalmente oxidantes.

### 1.3.2.2.2 Aços Inoxidáveis Martensíticos

São aços endurecíveis por tratamento térmico e tem a característica de serem magnéticos. Os teores de carbono e de cromo estão numa concentração tal que permite a formação de austenita a altas temperaturas, a qual se transforma em martensita durante o resfriamento. Apresentam boa resistência à corrosão atmosférica quando temperados e se destacam pelos diversos graus de dureza e resistência mecânica que podem obter. A seleção dos aços martensíticos é feita em função do compromisso entre as propriedades mecânicas.

### 1.3.3 Aços-Liga

Todos os aços-liga são mais caros do que os aços carbonos, sendo seu preço em geral tanto mais caro quanto maior a porcentagem de elementos de liga no aço. Por essa razão, só se empregam os aços-liga quando as condições de serviço impossibilitarem a utilização dos aços carbono.

Aços-liga são aços que possuem elementos de ligas presentes nos aços carbono em proporções mais altas, ou aços que possuam elementos de ligas que normalmente não entram na composição dos aços carbono. Conforme a percentagem total de elementos de liga distingue-se:

- Aços de baixa liga – até 5% de elementos de liga.
- Aços de média liga – de 5% até 10% de elementos de liga.
- Aços de alta liga – mais de 10% de elementos de liga.

Só é possível diferenciar os diversos tipos de aços de baixa liga e entre os aços de baixa liga e os aços carbono por meio da análise química ou pelo teste de pontos. O Teste por Pontos é um ensaio de identificação de materiais metálicos que consiste na aplicação de reagentes químicos em uma região de sua superfície previamente preparada. O reconhecimento do material se baseia nos efeitos de reações químicas, bem como nos resultados do teste do ímã (ensaio que se realiza em materiais metálicos pela aplicação de um ímã, classificando o material em magnético, levemente magnético e não magnético). (Cavalli, 2012)

### 1.3.3.1 Serviços de Aplicação dos Aços-Liga

#### 1.3.3.1.1 Altas Temperaturas

Serviços acima do limite de temperatura do uso prático do aço carbono ou dentro dos limites, quando necessária maior resistência mecânica (Figura 6), maior resistência à fluência ou maior resistência à corrosão.

Os aços para serviços a altas temperaturas são aços-liga especialmente projetados. Esses aços são comumente usados em aplicações como tubos de caldeiras, vasos de pressão e turbinas a vapor. A seleção de aços para uso a temperaturas elevadas é feita de acordo com as propriedades exigidas a altas temperaturas. Em geral, esses aços possuem maior resistência à degradação mecânica e química em temperaturas elevadas.

#### 1.3.3.1.2 Baixas Temperaturas

Uso de aços-ligas para temperaturas inferiores à -45°C (limite do aço carbono).

### 1.3.3.1.3 Alta Corrosão

Serviços onde o fluido é corrosivo, mesmo quando em temperaturas dentro da faixa usual de trabalho do aço carbono. Os aços-ligas têm, geralmente, maior resistência à corrosão que o aço carbono.

### 1.3.3.1.4 Sem Contaminação

Serviços onde não pode haver contaminação dos produtos, tais quais os produtos alimentícios e farmacêuticos. Nestes casos, mesmo as corrosões moderadas, sempre geram resíduos que vão contaminar o fluido contido no equipamento.

### 1.3.3.1.5 Segurança

Serviços com fluidos perigosos (temperaturas elevados, tóxicos, inflamáveis, explosivos etc.) ou em equipamentos de importância, para os quais qualquer interrupção causa grandes prejuízos.

### 1.3.3.2 Aços-Liga de Molibdênio e Cromo-Molibdênio

Composição: até 1% de Mo e 9% de Cr. Estes aços destinam-se especificamente a empregos em temperaturas elevadas. São todos materiais magnéticos com estrutura férrea. A Tabela 8 mostra a composição química e as principais propriedades usuais dessa classe.

Tabela 8: Aços Cr. Molibdênio (Fonte: ASME Div VIII, 2007).  
**Aços-Liga Molibdênio e Cromo-Molibdênio**

Elementos de liga (% nominal) Restante: ferro	Limites máximos de temperatura (°C)						Tensões admissíveis (kg/mm <sup>2</sup> ) Norma ASME Seç. VIII, Div. 1					
	Normas		Temperaturas de formação de crespas (v. Nota 1)		Resistência mecânica aceitável (v. Nota 2)	345 °C	430 °C	480 °C	540 °C	595 °C	650 °C	
	ASME Seç. I, III	ASME B-31.3	Ao ar	Oxidante c/SO <sub>2</sub>								
1/2 Mo	540	590	530	520	500	480	12,32	12,32	9,65	3,36	-	-
1 1/4 Cr, 1/2 Mo	650	650	550	560	530	520	12,18	12,18	10,58	5,48	2,82	0,84
2 1/4 Cr, 1 Mo	650	650	600	580	550	570	12,06	11,84	10,36	5,48	2,96	1,13
5 Cr, 1/2 Mo	650	650	650	600	575	480	12,06	11,35	7,96	3,95	2,18	0,92
7 Cr, 1/2 Mo	650	650	680	610	585	480	9,44	8,80	6,68	3,52	1,76	0,84
9 Cr, 1 Mo	650	650	700	620	600	600	9,44	9,02	8,56	5,98	3,32	1,06

Nota 1: temperaturas de formação de crespas – esses limites só podem ser ultrapassados em picos de curta duração.

Nota 2: temperaturas acima das quais a resistência mecânica (resistência à fluência) é muito baixa. Esses limites só podem ser ultrapassados, em serviço contínuo, para peças secundárias ou não-tensionadas. Para peças principais, só podem ser ultrapassados em picos de curta duração.

O principal efeito da adição de cromo é o aumento da resistência à oxidação, o cromo tem grande afinidade pelo oxigênio, e oxida-se preferencialmente, formando uma película forte e aderente: de óxidos e hidróxidos; que protege o ferro. A figura 11 mostra a variação

relativa da velocidade de oxidação dos aços ao cromo para a corrosão atmosférica e pelo ácido nítrico. O cromo ainda aumenta a resistência a rafitização, sendo que para os aços com mais de 1% de Cr, não há mais a ocorrência deste tipo de corrosão. A adição de Si, que pode chegar até 2,5%, também contribui para reduzir sensivelmente a oxidação em temperaturas elevadas.

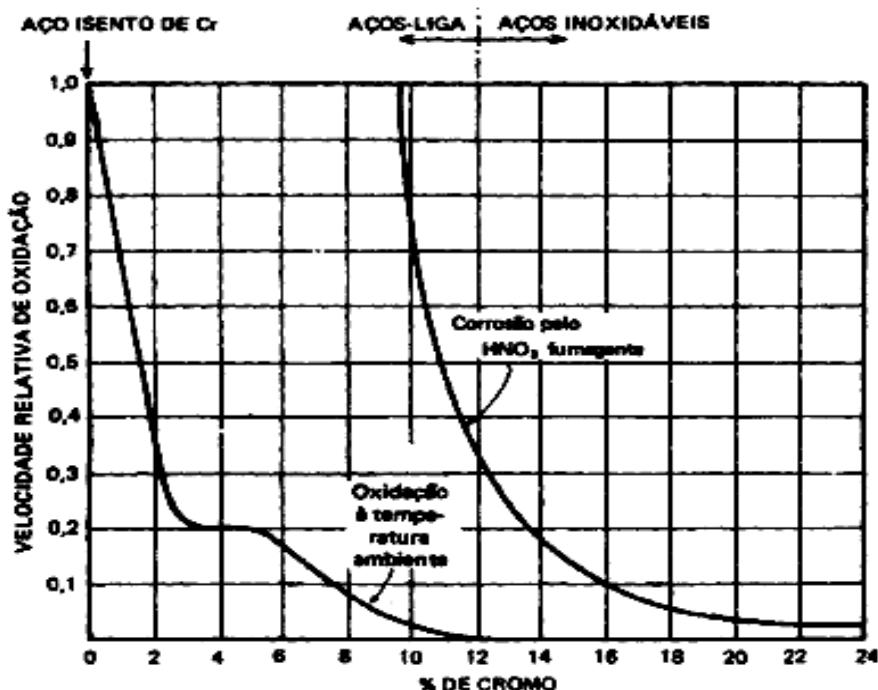


Figura 11: Velocidade de Oxidação X % Cr.(Fonte: Metals Hand book).

#### 1.3.3.2.1 Fatores Críticos Dos Aços Cr-Mo

Tratamento Térmico (metal de base e metal de solda):

- Tratamentos térmicos complexos são realizados para se obter as propriedades mecânicas requeridas.
- Dependendo da liga, tratamentos de normalização, revenimento e recozimento a várias temperaturas e durações são requeridos. A taxa de resfriamento também deve ser controlada.
- Para a junta soldada a mesma lógica deve ser seguida. (\*\*Atenção: A temperatura máxima de TT não deve ser excedida, o que poderia causar a dissolução dos precipitados e alterar as propriedades do material).
- Fragilização ao Revenido (metal de base e metal de solda)
- Exposição a temperaturas entre 375 – 575°C por longos períodos de tempo.

- Grande perda de ductilidade.
- Causado pelos elementos P, Sb, Sn, As, que migram para os contornos de grão e podem reduzir a ductilidade do material. O teor de Mn e Si também possui forte influência.
- A sensitividade a fragilização ao revenimento pode ser mensurada através de tratamentos térmicos e medida de tenacidade.
- Step Cooling

1.3.3.2.2 Soldabilidade dos Aços Liga ( Conforme Figura 12) / Defeitos de Soldagem :

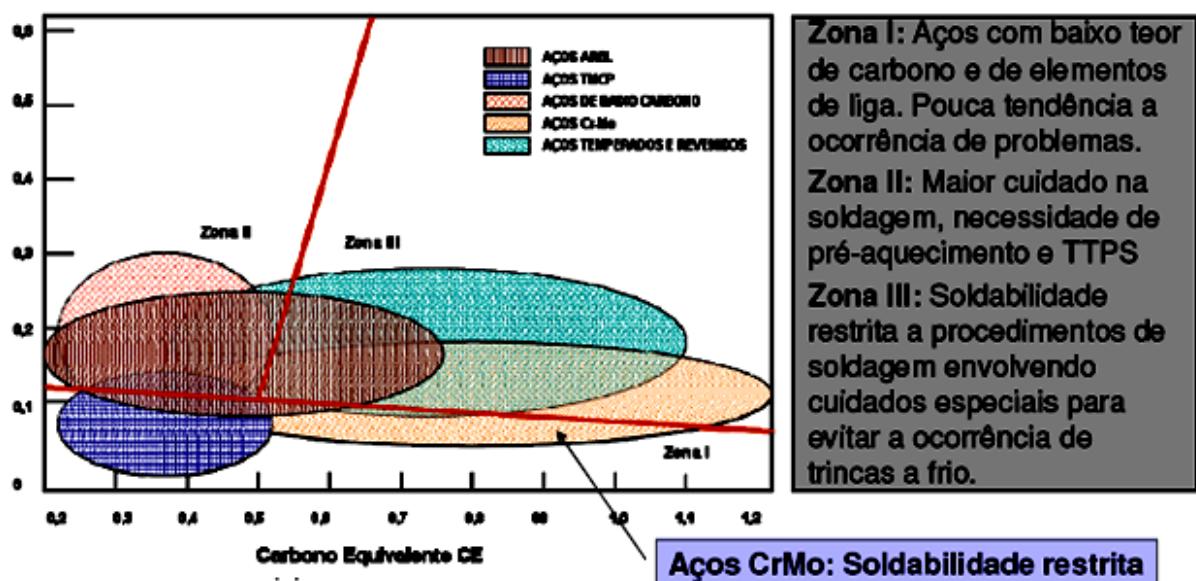


Figura 12: Gráfico: % Carbono X CEquivalente (Fonte: Ap.Eng.Mat. Uni Anchieta, Prof.Dr. Aílton Cavalli).

#### A) TRINCA Á FRIO.

- O hidrogênio possui menor solubilidade e maior difusibilidade na ferrita ( $\alpha$ ) que na austenita ( $\gamma$ ).
- A austenita da zona fundida tende a se transformar primeiro em ferrita que na ZTA.
- Difusão do hidrogênio para a ZTA. ( Figura 13 demonstra o mecanismo )
- Recombinação
- Elevadas pressões
- Ruptura

#### A1) FATORES CONTRIBUEM PARA OCORRÊNCIA DO TRINCAMENTO A FRIO:

- Microestrutura
- Alto índice de tensões

- Presença de hidrogênio. (Conforme Figura 13)

### MECANISMO DE DIFUSÃO DE HIDROGÊNIO PARA ZTA:

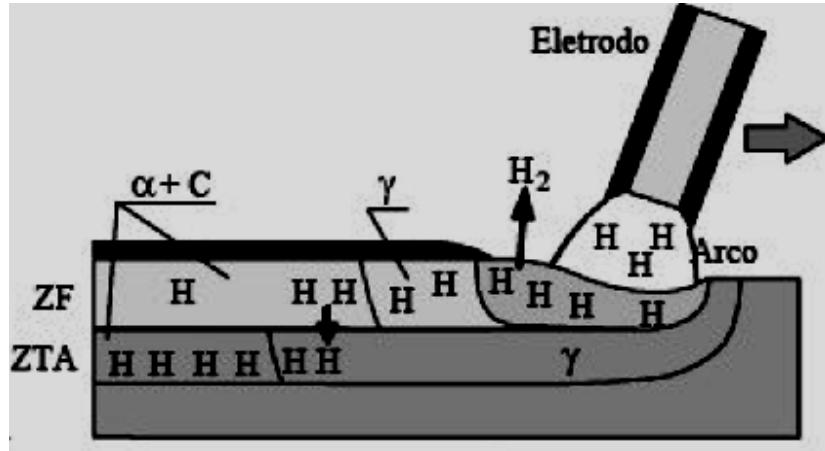


Figura 13: Mecanismo de Difusão de Hidrogênio (Fonte: apostila Soldabilidade dos Aços Transformáveis 2004).

### A2) COMO EVITAR TRINCAS Á FRIO:

- Reduzir o teor de hidrogênio na solda:
  - Seleção do processo de soldagem
  - Limpeza da região a ser soldada
  - Remoção de umidade superficial – Pré-aquecimento
- Minimizar o nível de tensões:
  - Projeto das juntas
  - Eliminar concentradores de tensão/defeitos de soldagem
- Minimizar a formação de microestrutura frágil:
  - Diminuir a velocidade de resfriamento – Pré-aquecimento.
  - Pós-aquecimento - Aumentar o tempo para evolução do hidrogênio.

### B) TRINCAS DE REAQUECIMENTO:

- Conhecida também como trinca de alívio de tensões.

- Ocorre durante TTPS (450 – 700°C ou serviço em elevadas temperaturas 300 – 500°C).
- Elementos críticos: C, Cr, Cu, Mo, B, V, Nb e Ti.
- Os aços CrMo são susceptíveis a esse tipo de defeito.
- Trincas: ocorrem tanto na ZF quanto na ZTA, sendo Intergranulares, mais comum na ultima na ZTA, aços ligados apresentam valores de dureza altos, que variam conforme a liga na ZTA.(Fig. 14).
- Elementos residuais como P, S, Sn, As e Sb, aumentam a tendência à fissuração ao reaquecimento.

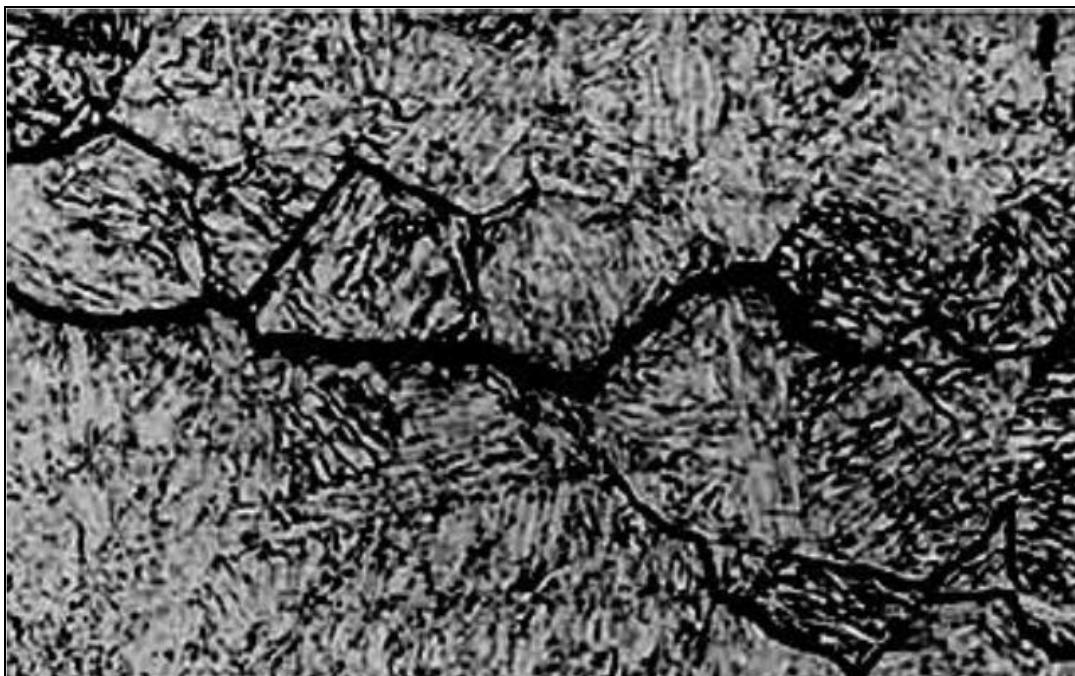


Figura 14: Trinca de Alívio de Tensão (Fonte: SP Ghiya, D V Bhatt, R V Rao. Proceedings of the World Congress on Engineering, 2009).

### B1) FATORES CRÍTICOS:

- Composição química do material
- Impurezas como P, S, Sn, As e Sb aumentam a tendência à fissuração ao reaquecimento.
- Microestrutura de baixa ductilidade e granulação grosseira
- Nível de restrição da junta
- Concentradores de tensão.

### C) TRINCA TIPO IV(Figura 16):

- Queda de resistência à fluência.

- Região de baixa dureza é formada na ZTA
- Durante serviço há uma deformação progressiva dessa região.
- Evidenciado a temperaturas de operação superiores a 565°C (838K).

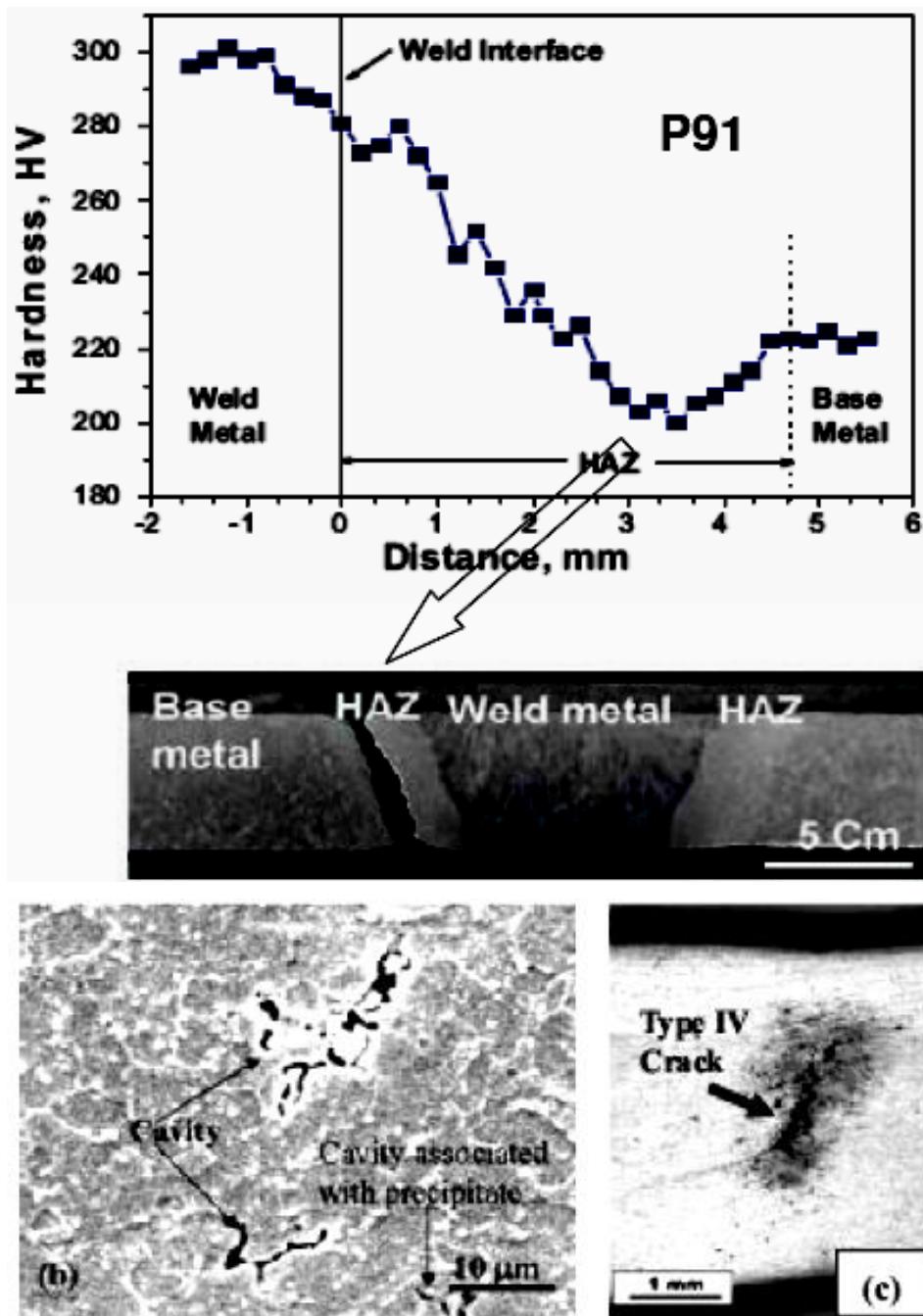
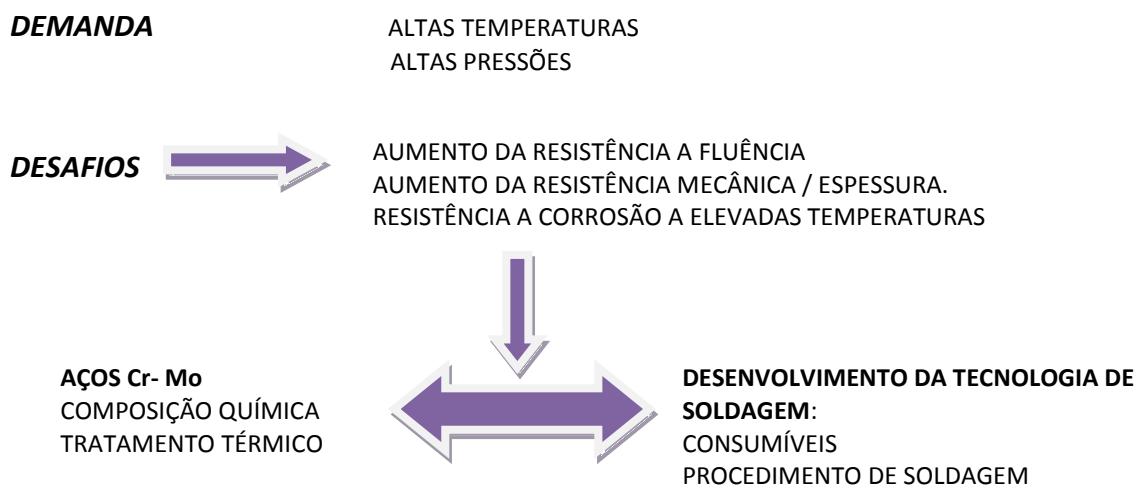


Figura 15: Trinca tipo IV/Cavidades associadas à precipitação num aço P9 Modificado (P91).  
Fonte:Dr. K. Laha, Type IV Cracking in Modified 9Cr-1Mo Steel Weld.

### 1.3.3.3 Aços 9Cr-1Mo (Metal Base)

O aumento no teor de cromo faz com que não só a resistência mecânica do material aumente, mas com que a resistência à fluência e a resistência à oxidação também aumente. A microestrutura do material também varia com o aumento do cromo. Desta forma, para as classes com menor teor de cromo como o A335 Gr. 11 tem estrutura perlítica. À medida que o teor de cromo aumenta, passamos por materiais perlíticos-bainíticos, como o A335 P22, materiais bainíticos-martensíticos como o A335 P5 e A335 P9 chegamos a ter microestruturas completamente martensíticas para o A335 P91 e A335 P122.



#### 1.3.3.3.1 Classificações Equivalentes:

- ASTM A335 P9
- ASTM A336 P9
- ASTM A387 Gr.9
- ASTM A217Gr. C12
- ASTM A213 T5
- ASTM A234 WP9
- X11CrMo9-1

#### 1.3.3.3.2 Aplicações:

- Temperaturas de serviço usuais até 585°C

- Vasos de pressão e reatores para serviços a altas temperaturas ou sujeitos a corrosão sulfúrica.
- Caldeiras
- Tubulações.

#### 1.3.3.3.3 Soldagem dos Aços Cromo Molibdenio (9Cr-1Mo).

A soldagem dos aços Cr-Mo, embora algumas vezes possa parecer simples, traz junto com estes materiais a necessidade de cuidados especiais para evitar a fragilização da junta soldada (zona fundida + zona termicamente afetada + metal de base adjacente). Em princípio, os materiais de base detêm estruturas cuidadosamente refinadas através do processamento termomecânico imposto durante a fabricação das chapas, tubos ou forjados. No entanto, a estrutura bruta de fusão apresentada na zona fundida é completamente diferente, sendo esta muito mais frágil. Para que possamos obter uma solda com elevada qualidade, cuidados especiais devem ser tomados quanto aos seguintes fatores:

- Seleção de consumíveis
- Procedimento de soldagem
- Equipamentos de controle de temperatura
- Mão de obra

Na maioria das vezes, nos equipamentos ou tubulações onde estes materiais são aplicados, temos a necessidade de trabalhar com elevadas espessuras, pois as pressões e temperaturas são muito altas.

#### 1.3.3.4 Procedimento de Soldagem

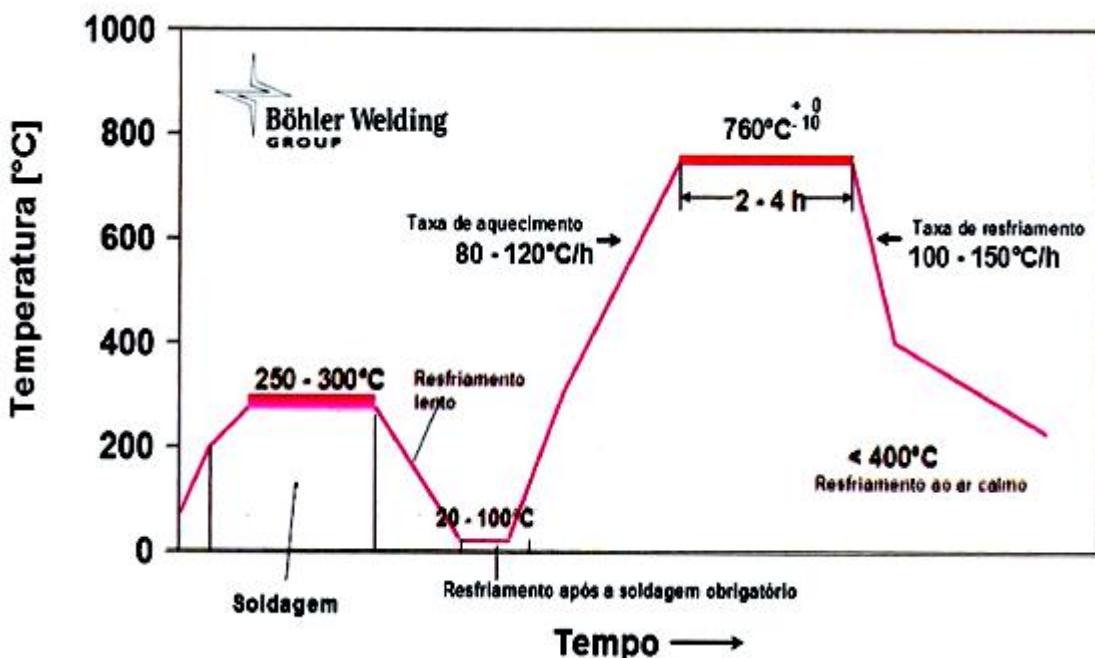
Os procedimentos de soldagem, combinados com os consumíveis ideais são os grandes responsáveis pela qualidade da junta soldada. Os principais fatores que são apresentados nos procedimentos de soldagem que podem influenciar na qualidade de uma junta de aço Cr-Mo são:

- pré-aquecimento, energia de soldagem, pós-aquecimento,
- tratamento térmico, taxas de aquecimento e resfriamento.

Todos estes fatores combinados irão resultar em uma microestrutura adequada do metal de solda. Alterando-se, por exemplo, a temperatura de pré-aquecimento do material, a velocidade de solidificação da zona fundida e posteriormente a velocidade de resfriamento da zona fundida e da zona termicamente afetada, mudam bruscamente.

Para velocidades maiores, teremos um aumento nos valores de resistência mecânica e de dureza, com consequente perda de tenacidade do material.

Quando estivermos trabalhando com materiais bainíticos ou martensíticos, como o ASTM A335 P91, a microestrutura pode se tornar tão frágil que durante um choque na movimentação do equipamento ou tubulação, uma ruptura da zona termicamente afetada ou na zona fundida, pode ocorrer. Veja abaixo na Figura 17 alguns cuidados com as temperaturas usadas durante as etapas de soldagem e tratamento térmico recomendados pela BOHLER Welding Group para a soldagem de materiais ASTM A335 P91.



**Figura 16:** Temperaturas utilizadas em procedimentos de soldagem ASTM335 Gr.9(Fonte: Catálogo BOHLER WELDING GROUP).

### 1.3.3.5 Seleção de Consumíveis

Normalmente no Brasil, os consumíveis de soldagem seguem as classificações impostas pela norma AWS (American Welding Society), a qual contempla as especificações e classificações apresentadas na Tabela 9. Consultando a norma, somos capazes de verificar a composição química e as propriedades mecânicas dos consumíveis de soldagem aplicados aos aços Cr-Mo.

No entanto, para garantirmos que o metal depositado atenda as condições mais severas de pressão e temperatura de operação dos equipamentos e tubulações, muitas vezes esta norma não contempla requisitos de fluência, controle de elementos residuais, propriedades mecânicas após os diversos ciclos de tratamento térmico usados na fabricação dos equipamentos, dureza máxima, etc.

Tabela 9:Consumíveis de Soldagem (fonte: AWS)

Grade	Eletrodo Revestido AWS A5.5	Varetas Arames Sólidos AWS A5.28	Arames para Arco Submerso AWS A5.23
<b>P11</b>	E8018-B2	ER80S-B2	EB2
<b>P22</b>	E9018-B3	ER90S-B3	EB3
<b>22V a)</b>	E9018-B3 (mod.)	ER90S-B3 (mod.)	3B3 (mod.)
<b>P23</b>	E9015-G	ER90S-G	EG
<b>P24</b>	E9015-G	ER90S-G	EG
<b>P9</b>	E8018-B8	ER80S-B8	EB8
<b>P91</b>	E9015-B9	ER90S-B9	EB9
<b>P92</b>	E9015-G	ER90S-B9 (mod.)	EB9 (mod.)
<b>P911</b>	E9015-G	ER90S-B9 (mod.)	EB9 (mod.)

a) Material pertencente a norma ASTM A542 Tipo D Classe 4

## 2.0 TRATAMENTOS TÉRMICOS

A temperatura à qual o metal é aquecido, o período de tempo em que ele é mantido àquela temperatura e a taxa sob a qual ele é resfriado, todos esses parâmetros influenciam na estrutura cristalina do metal. Essa estrutura cristalina, normalmente denominada *microestrutura*, determina as propriedades específicas dos metais. Há vários modos de se manipular a microestrutura, seja na siderúrgica ou no procedimento de soldagem. Dentre os métodos mais comuns de se manipular a microestrutura estão os tratamentos térmicos.

Tratamentos térmicos raramente são requeridos para aços de baixo carbono ou estruturais, embora sejam ocasionalmente empregados para evitar empenamento ou para garantir baixa dureza e facilitar a usinagem.

### 2.1 Pré-Aquecimento

Os metais em sua maioria são bons condutores de calor. Consequentemente o calor na região de soldagem é rapidamente escoado por toda a massa envolvida no processo, acarretando um resfriamento relativamente rápido. Em alguns metais esse resfriamento rápido pode contribuir para a formação de microestruturas prejudiciais na região de soldagem. O pré-aquecimento da junta a ser soldada é uma maneira de reduzir a taxa de resfriamento do metal. A temperatura de pré-aquecimento pode variar de 50°C a 540°C, sendo mais comumente aplicada na faixa de 150°C a 200°C. (Petrobrás,

N-133 ,capítulo 4,"Temperatura de Pré-aquecimento e Temperatura Interpasse", item 4.8 e capítulo 5,item 5.1.4 "Condições Específicas: Temperatura de Pré-aquecimento e Temperatura Interpasse, rev J. Ed.2002; 2<sup>a</sup>Emenda 2005).

Durante a soldagem de aços de alto carbono ou de alta liga existe o perigo de que o depósito de solda e a zona termicamente afetada contenham altos percentuais de martensita, um constituinte duro do aço. Tais soldas possuem alta dureza e baixa ductilidade e podem mesmo vir a trincar durante o resfriamento. O objetivo do preaquecimento (e também do pós-aquecimento) é manter o teor de martensita da solda a um nível mínimo. De ambos os tratamentos resultam melhor ductilidade, baixa dureza e menor probabilidade de fissuração durante o resfriamento.

A martensita forma-se realmente durante o resfriamento da solda e da zona termicamente afetada. A quantidade de martensita formada pode ser limitada reduzindo-se a taxa de resfriamento da solda. O pré-aquecimento aumenta a temperatura do metal vizinho à solda, de tal modo que o gradiente de temperatura (isto é, a diferença de temperatura) entre a solda e sua vizinhança fique reduzido. O resultado é que a zona de soldagem aquecida resfria-se mais lentamente, visto que a taxa de resfriamento é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura entre as massas quente e fria.

Em resumo, o pré-aquecimento reduz:

- o risco de trincas por hidrogênio;
- as tensões de contração;
- a dureza na zona termicamente afetada (ZTA).

Se esses tratamentos térmicos devem ou não ser aplicados depende do teor de carbono e de outros elementos de liga no metal sendo soldado. Se corpos de prova soldados sem tratamento térmico apresentarem baixa ductilidade ou dureza muito alta, é indicativo da necessidade de pré-aquecimento ou pós-aquecimento. Além da composição química, a rigidez da junta a ser soldada e o processo de soldagem também influenciam a necessidade de se realizar um pré-aquecimento.

A necessidade do pré-aquecimento aumenta com os seguintes fatores:

- teor de carbono do material de base;
- teor de ligas do material de base;
- tamanho da peça;
- temperatura inicial;
- velocidade de soldagem;
- diâmetro do consumível.

### 2.1.1 Como Determinar a Temperatura de Pré-Aquecimento

A composição do material de base deve ser conhecida para se escolher a temperatura de pré-aquecimento correta, pois ela é controlada por dois principais fatores:

- o teor de carbono do material de base;
- o teor de ligas do material de base;

Basicamente quanto maior for o teor de carbono do material de base, maior será a temperatura de pré-aquecimento requerida. Esse raciocínio se aplica também ao teor de ligas, mas num grau levemente menor.

Um método simples para determinar a necessidade de preaquecimento de uma solda é o do carbono equivalente (Ceq). A temperabilidade de um aço está relacionada ao seu teor de carbono acrescido dos teores de certos elementos de liga.

Quanto maior for o carbono equivalente maior será a temperatura de pré-aquecimento requerida.

Outros fatores importantes para se determinar a temperatura de pré-aquecimento são a espessura e o tamanho do componente. A temperatura de pré-aquecimento aumenta com o tamanho e a espessura do componente.

Para o cálculo do carbono equivalente determina-se o teor aproximado de outros elementos de liga que produzem a mesma dureza que 1% de carbono. Então o carbono equivalente (Ceq), que é uma indicação da temperabilidade, pode ser calculado por:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Cu}{13}$$

NOTA: O Ceq calculado da análise de panela é normalmente menor que o Ceq baseado na análise do produto por causa da segregação que ocorre no lingote.

Essa fórmula é válida quando os teores estão dentro das faixas:

- %C < 0,50
- %Mn < 1,60
- %Ni < 3,50
- %Mo < 0,60
- %Cr < 1,00

- %Cu < 1,00

Outra equação para o carbono equivalente, largamente utilizada, é dada pelo IIW (*International Institute of Welding*):

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

A espessura do metal de base pode tornar necessário o preaquecimento mesmo para aços de baixo carbono. Existem vários métodos para se calcular a temperatura de pré-aquecimento considerando também a espessura, sendo as Equações 1 e 2 as mais usuais.

Equação 1:

$$\text{Temperatura de pré - aquecimento } ({}^\circ\text{C}) = 350 \times \sqrt{C_{eq\text{total}} - 0,25}$$

Equação 2:

$$C_{eq\text{total}} = 0,005 \times C_{eq} \times \text{espessura (mm)}$$

A Tabela 10 fornece valores sugeridos de temperaturas de pré-aquecimento para diferentes valores de carbono equivalente:

Tabela 10: Temperaturas de pré-aquecimento X C. Equivalente (Fonte: Modenesi, P.J; Marques, P.V; Bracarense, A.Q; Soldagem (Fundamentos e Tecnologia, UFMG, 2005).

Carbono equivalente $C_{eq}$ (%)	Temperatura de pré-aquecimento recomendada
< 0,30	opcional
0,31 - 0,45	100°C - 200°C
0,45 - 0,60	200°C - 250°C
> 0,60	250°C - 300°C
Aços ferramenta, aços mola, aços de composição desconhecida	~ 300°C

Alguns aços, particularmente aqueles possuindo carbono equivalente maior que 0,45%, podem requerer, além de pré-aquecimento, pós-aquecimento. Esses tratamentos são especialmente recomendados para a soldagem de seções espessas. Entretanto, para a maioria dos aços carbono e de baixa liga, apenas o pré-aquecimento é necessário de um modo geral.

O pré-aquecimento a 120 - 150°C é geralmente empregado na soldagem multipasse em seções de espessura maior que 25 mm para reduzir a susceptibilidade da solda à fissuração.

Quando a temperatura de pré-aquecimento correta for determinada é essencial que esta temperatura seja medida e mantida durante a operação de soldagem. Normalmente todas as aplicações que requerem pré-aquecimento requerem também resfriamento lento.

Alguns aços, particularmente aqueles possuindo carbono equivalente maior que 0,45%, podem requerer, além de pré-aquecimento, pós-aquecimento. Esses tratamentos são especialmente recomendados para a soldagem de seções espessas. Entretanto, para a maioria dos aços carbono e de baixa liga, apenas o pré-aquecimento é necessário de um modo geral.

O pré-aquecimento a 120 - 150°C é geralmente empregado na soldagem multipasse em seções de espessura maior que 25 mm para reduzir a susceptibilidade da solda à fissuração.

Quando a temperatura de pré-aquecimento correta for determinada é essencial que esta temperatura seja medida e mantida durante a operação de soldagem. Normalmente todas as aplicações que requerem pré-aquecimento requer também resfriamento lento largamente utilizado em soldas de aços carbono bem como de aços de baixa, média e alta liga.

## 2.2 Tipos Mais Comuns de Tratamentos Térmicos

### 2.2.1 Alívio de Tensões

Os metais se expandem quando aquecidos e se contraem quando resfriados. A dilatação é diretamente proporcional à variação de temperatura ou, de outro modo, à quantidade de calor aplicada. Numa junta soldada o metal mais próximo da solda está sujeito às mais altas temperaturas e, à medida que aumenta a distância da solda, a temperatura máxima atingida diminui. O aquecimento heterogêneo causa contração-expansão também heterogênea e pode causar distorções e tensões internas no metal de solda. Dependendo de sua composição e aplicação o metal pode não ser capaz de resistir a essas tensões e trincar ou pode ocorrer falha prematura da peça. Uma maneira de minimizar essas tensões ou de aliviá-las é pelo aquecimento uniforme da estrutura após a soldagem ter sido realizada. O metal é aquecido a temperaturas logo abaixo do ponto onde possa ocorrer alguma alteração micro estrutural e então é resfriado lentamente.

Seguindo a atividade de soldagem, o resfriamento e a contração do metal de solda originam tensões na solda e nas regiões adjacentes.

O objetivo do alívio de tensões é reduzir essas tensões. Esse tratamento leva a junta soldada a uma condição mais durável; a ductilidade é aumentada sobremaneira, embora a resistência mecânica diminua ligeiramente. Certos códigos permitem maiores tensões de projeto, desde que seja aplicado o alívio de tensões. Tipicamente, o alívio de tensões consiste no aquecimento da peça a uma temperatura em torno de 600°C e em sua manutenção por uma hora para cada 25 mm de espessura. O conjunto é então resfriado lentamente em ar calmo até 300°C. Se temperaturas altas como 600°C forem impraticáveis, podem ser empregadas temperaturas mais baixas com um tempo de encharcamento mais longo. A Tabela 11 ilustra os tempos recomendados conforme a temperatura empregada para o alívio de tensões. (POST WELD HEAT TREATMENT (Tratamento Térmico Pós-Soldagem); Tabela 132; Pn°5A e Pn°8 da norma AISI; The American Society of Mechanical Engineers ASME B31.1, 2004).

Tabela 11: Tempo e Temperatura de Alívio de Tensões

<b>TEMPO E TEMPERATURA DE ALÍVIO DE TENSÕES</b>	
Temperatura (°C)	Tempo (h/25 mm)
595	1
565	2
535	3
510	5
480	10

## 2.2.2 Re却imento Pleno

O re却imento pleno possui outra função adicional em relação ao alívio de tensões simples: além de levar a peça soldada a uma condição sem tensões, assegura ductilidade e baixa dureza à solda e à zona termicamente afetada. Além disso, consegue-se também uma microestrutura fina e uniforme. Esse tratamento térmico consiste:

- No aquecimento do conjunto 30°C a 60°C acima da temperatura crítica, isto é, aquela em que ocorre a alteração micro estrutural (nos aços, de 840°C até 1.000°C).
- Na manutenção do patamar de temperatura por um tempo suficiente para promover uma mudança uniforme;
- E no resfriamento lento do conjunto, usualmente dentro do forno.

Pecas soldadas raramente sofrem recozimento porque temperaturas muito altas podem causar distorções na estrutura soldada.

### 2.2.3 Normalização

Esse tratamento é na realidade outra forma de recozimento. As temperaturas utilizadas são as mesmas que no caso do recozimento (usualmente 60°C acima da temperatura de transformação micro estrutural), mas a normalização pressupõe resfriamento em ar calmo até a temperatura ambiente em vez de resfriamento no forno.

As tensões internas são aliviadas, porém a solda não fica com a mesma ductilidade e baixa dureza obtidas com o recozimento pleno.

Pelos tratamentos térmicos de alívio de tensões e recozimento ou normalização há uma restauração parcial ou completa das propriedades originais dos aços. (Fig.18).

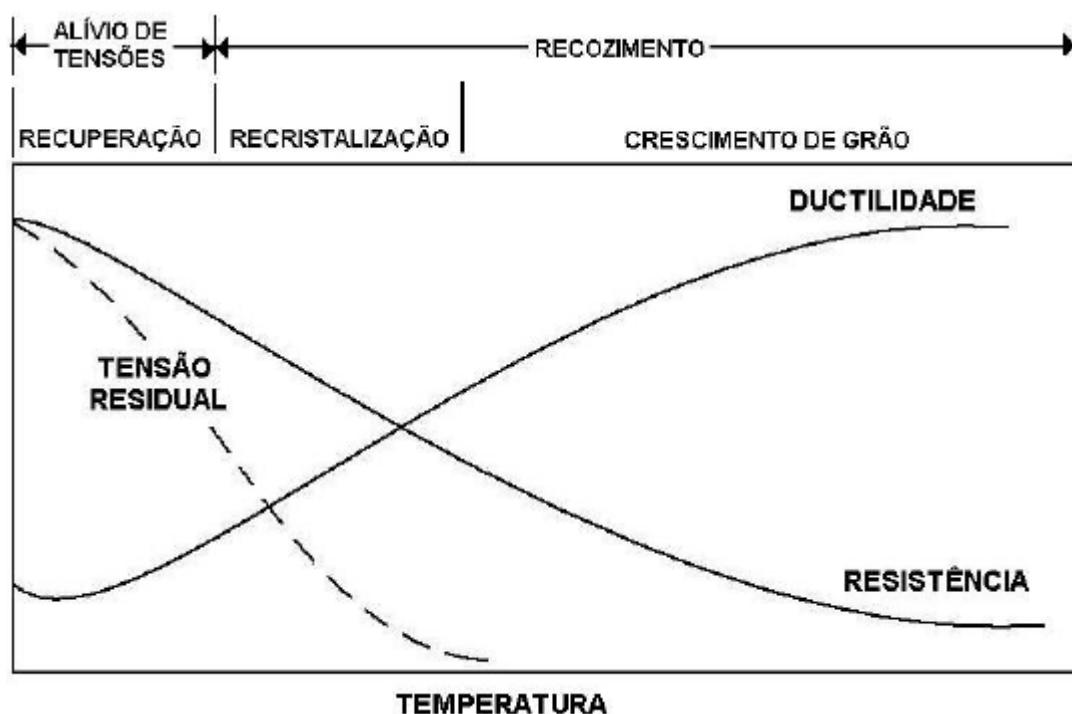


Figura 17: Alterações micro estruturais e mecânicas decorrentes dos tratamentos térmicos pós-soldagem (esquemático). (Fonte: Apostila Metalurgia da Soldagem ESAB; Elaborado, traduzido (parte) e adaptado por Cleber Fortes – Engenheiro Metalúrgico, M.Sc. Assistência Técnica Consumíveis – ESAB BR).

#### 2.2.4 Têmpera

A dureza de um aço pode ser aumentada aquecendo-o de 30°C a 60°C acima da temperatura de alteração micro estrutural, e então mergulhando o metal em uma solução líquida que rapidamente o resfrie. O resfriamento rápido, conhecido como têmpera, forma uma microestrutura denominada martensita, que distorce a rede cristalina do aço e aumenta sua dureza e sua resistência mecânica. As soluções de têmpera usadas nesse processo são classificadas de acordo com a velocidade com que resfriam o metal, isto é, óleo (rápido), água (mais rápido) e salmoura (o mais rápido).

#### 2.2.5 Revenimento

Depois que o metal sofre têmpera, é usualmente revenido. O revenimento é um processo no qual o metal é reaquecido até uma temperatura abaixo de 725°C, mantido a essa temperatura por certo intervalo de tempo, e então resfriado até a temperatura ambiente.

O revenimento reduz a fragilidade que é característica dos aços temperados, produzindo, portanto um balanço entre alta resistência e tenacidade.

O termo tenacidade, aplicado aos metais, normalmente significa resistência à fratura frágil ou tenacidade ao entalhe sob certas condições ambientais. Os aços que sofrem esse tipo de tratamento térmico são conhecidos como aços temperados e revenidos.

### 2.3 ZAT /ZTA/ZAC (Zona Afetada pelo Calor ou Zona Térmicamente Afetada)

Nenhuma solda por fusão pode ser realizada sem acumular um gradiente térmico no metal de base. A difusão de calor para o metal de base é fortemente influenciada pela temperatura da poça de fusão e pela velocidade de soldagem.

Num ponto da ZTA logo além da borda da poça de fusão a temperatura aumenta rapidamente a um nível próximo do da poça de fusão e diminui rapidamente produzindo um efeito como o de têmpera. Em aços essa região torna-se austenítica durante o aquecimento e pode conter o constituinte duro conhecido como *martensita* quando se resfria. Essa região desenvolve grãos grosseiros (*região de crescimento de grão*), porém um pouco mais além, onde a temperatura não foi tão alta, entrando na faixa acima da temperatura de transformação, mas não atingindo a região austenítica, o tamanho de grão é menor (*região de refino de grão*). Mais além ainda, não há alteração no tamanho de grão, mas o calor é suficiente para reduzir a dureza dessa região e eliminar até certo ponto os efeitos de qualquer encruamento (*região intercrítica*).

Efeitos metalúrgicos similares são também observados na ZTA após cortes com aporte térmico. Em materiais endurecíveis por solução sólida como ligas de alumínio, por exemplo, a região próxima à poça de fusão torna-se efetivamente solubilizada por tratamento térmico e terá sua dureza aumentada com o tempo ou com um tratamento térmico subsequente a baixas temperaturas, causando endurecimento por precipitação. Em materiais que não sofrem transformação, como os aços, nem endurecem por solução sólida, como ligas de alumínio tratáveis termicamente, os efeitos do calor são mais simples, sendo aplicados principalmente para reduzir a dureza e para a eliminação completa ou parcial do encruamento.

Raramente a condição de soldagem é tão simples como foi descrita acima porque os metais de base são frequentemente imperfeitos quando observados detalhadamente, sendo também possível para a poça de fusão introduzir hidrogênio na zona termicamente afetada.

Esta é, portanto, uma região potencial de defeitos e seu comportamento em um material qualquer é um aspecto importante da consideração de soldabilidade.

Soldabilidade, no entanto, é uma propriedade do material que não pode ser definida precisamente porque varia com o processo empregado e com a maneira como o processo é utilizado.

Materiais com soldabilidade ruim podem ser soldados satisfatoriamente desde que seja tomado muito cuidado na seleção do consumível, no controle da soldagem e na inspeção final. Isso frequentemente significa muitos testes e naturalmente um aumento nos custos. (Cleber Fontes, Engº Metalúrgico, 2004).

### 3.0. ENSAIO DE DUREZA

A resistência de um metal a penetrações é uma medida de sua dureza e também uma indicação de sua resistência. Para executar o ensaio de dureza, uma carga fixa força o penetrador no corpo de prova. A profundidade de penetração ou o tamanho da impressão é medido. A medição é convertida para um número de dureza através do emprego de uma série de tabelas bem estabelecidas. As tabelas mais comuns são a Brinell, Vickers, Knoop e Rockwell. A dureza Rockwell é adicionalmente dividida em diferentes escalas e, dependendo do material a ser testado, da forma do penetrador e da carga aplicada, as tabelas de conversão podem diferir. Por exemplo, um material relacionado como tendo uma dureza nas escalas Rb ou Rc significa que sua dureza foi determinada a partir da escala Rockwell "B" ou da escala Rockwell "C".

Em processos como Brinell e Vickers a dureza é expressa entre a carga suportada e a área da indentação ( $\text{Kgf./mm}^2$ ).

Investigações teóricas e empíricas resultaram em relações confiáveis e quantitativamente precisas também entre dureza e outras propriedades dos materiais, como coeficiente de escruamento, tensão de fadiga e fluência.

Estas relações auxiliam na avaliação com precisão suficiente para o controle da qualidade durante os estágios intermediários e finais de fabricação e montagem. Em muitas situações o ensaio de dureza é a única alternativa disponível de teste não destrutivo para qualificação e liberação de componentes para operação, como é o caso estudado neste trabalho.

Através de um conceito aparentemente simples, a dureza é uma propriedade que representa efeito de complexos campos de tensões elásticas e plásticas induzidas no material a ser testado.

Eventos microscópicos como o movimento de discordâncias e transformações de fases que podem ocorrer no material sob o endentado, não são necessariamente os mesmos para o mesmo material em diferentes endentações mesmo em condições idênticas. Entretanto, a experiência, que é o nosso foco principal, tem mostrado que endentações produzidas em situações idênticas de teste são aproximadamente idênticas macroscopicamente e as medições de suas dimensões produzem valores de dureza com repetibilidade satisfatória a ponto de ser confiável.

A partir das características supracitadas, utilizamos o ensaio de dureza como parâmetro para concluir o sucesso desejável do *mock up* objeto deste estudo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para que se assegure que a peça, no fim de seu ciclo de montagem, seja uma cópia fiel do desenho de projeto original. Um protótipo, denominado de *mock up* foi fabricado e testado com o intuito de demonstrar que as exigências dimensionais, metalúrgicas e especificações técnicas contidas nos documentos de projetos e de soldagem correlatos foram cumpridos de forma satisfatória, apesar de ser executada de forma diferente do pré-estabelecido.

Para tanto é mister que se faça respeitar aos parâmetros de qualidade do produto estabelecidas através do desenho de projeto, pelas normas aplicáveis e sua respectiva adequação aos meios produtivos e executivos disponíveis. Os dois últimos são objeto deste estudo.

Amostras foram produzidas e soldadas conforme Instrução de Execução e Inspeção de Soldagem, (anexo I) e EPS/QPS Especificação de Procedimento de Soldagem (anexoII) / Qualificação de Procedimento de Soldagem (anexo III).

O Tratamento Térmico foi executado de três formas diferentes conforme previstas:

- 1- No documento de Soldagem (740°C / 2 horas).
- 2- Obedecendo a curva de secagem (660° / 12 horas).
- 3- Obedecendo a temperatura do procedimento de Ignição do Equipamento (750° C/ 2 horas).

Obs.: Todos os corpos de prova foram submetidos ao tratamento térmico á 480°C por 12 horas conforme procedimento de pré-secagem dos refratários. O objetivo desta etapa é ter um *mock up* adequado, caso haja sensitização do aço inox austenítico, facilitando assim o processo de análise de falhas, caso esta ocorra durante o funcionamento do Forno.

Foram medidas as durezas em seis pontos antes do tratamento térmico e nove pontos depois do tratamento térmico. Foi utilizado o durômetro de bancada nº F-0958, situado no laboratório de ensaios mecânicos da Confab Tubos na planta de Pindamohangaba-SP.

A dureza, também foi medida no campo com o aparelho de medição de dureza portátil MIC-10, somente para comprovar que a conformação da peça não permite ao endentador atingir a dureza da ZAT.(Foto 1 e Foto 2), conforme o procedimento de soldagem exige.



FOTO 1: Caneta MIC 10 X Skin Point (Situação real em Campo) Fonte: Databook Forno de Reforma Catalítica.



FOTO 2: Caneta MIC 10 X Skin Point ( Situação real em Campo)Fonte: Databook Forno de Reforma Catalítica.

## 4.0 MATERIAIS DE BASE

### 4.1. Material de Base 1:

- **AÇO INOXIDÁVEL AISI 310 CHAPA 2 mm X 20 mm X 5 mm.**

#### 4.1.1 Características

Aço cromo-níquel, inoxidável austenítico, não magnético, de elevada resistência térmica e tenacidade. Caracteriza-se pela formação de uma camada superficial de óxidos, que não se desprende durante os ciclos térmicos e que proporciona alta resistência ao ataque de gases quentes, de produtos de queima, de sais e metais fundidos em temperaturas elevadas.

Chapa de 2 mm de espessura X 20 mm comprimento e 5 mm de largura, 12peças.

#### 4.1.2 Aplicações

Este aço é destinado à fabricação de retortas para fornos de tratamentos térmicos, caixas de cementação, componentes de turbinas a gás, incineradores e peças que exigem alta resistência à corrosão em temperaturas elevadas. É amplamente utilizado no revestimento de caldeiras e fornos nas indústrias metalúrgicas, de vidros, de materiais cerâmicos, cimento, etc.

#### 4.1.3 Composição Química

ABNT/SAE/AISI	C máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Si máx.	Ni	Cr
AISI 310	0,25	2,00	0,045	0,030	1,50	19,00 - 22,00	24,00 - 26,00

#### 4.2. Material De Base 2:

- **AÇO “BAIXA LIGA Cr –Mo ASTM 335 –P9: TUBO DE 4” DN, SCHEDULE 80 (10,5mm).**

##### 4.2.1 Características

Composição: até 1% de Mo e 9% de Cr. Estes aços destinam-se especificamente a empregos em temperaturas elevadas. São todos materiais magnéticos com estrutura férrea. Como serpentinas de caldeiras, fornos e afins.

##### 4.2.2 Composição Química

ASTM	C máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Si máx.	Cr	Mo
ASTM 335 P9.	0,15	0,30 ~0,60	0,025	0,025	0,25 ~ 1,00	8,00 ~10,00	0,90 ~1,10

Obs.: Existem traços de Ni, Cu e Al residuais.

##### 4.2.3 Outras Características

Fabricante: Michigan Seamless Tube  
 Quantidade: 150 Peças (~1455 Metros)  
 Apresentação: Tubos 4”  
 Espessura: 10,5 Mm  
 Certificado N°: 48178

#### 4.3 Metal de Adição

#### 4.3.1 Características

Varetas e arames especiais Ni Cr3, indicado para soldagem de ligas INCONEL, INCOLOY; soldagens dissimilares entre estes e ligas de MONEL, aços carbono e baixa liga, aços inoxidáveis, níquel e outros. Limpeza da área de soldagem é indispesável e essencial para que o comprimento do arco seja mantido sempre curto, não sobrecarregue o eletrodo com amperagem excessiva, soldar somente com eletrodo bem seco, preparar as juntas seguindo as normas, espessuras superiores a 350 mm, devem ser chanfradas.

#### 4.3.2 Composição Química

AWS	Ni%	Mn máx.%	Cb%	Nb%	Cr%	N	Mo
<b>5.14</b>	72	3	2,5	2,5	20	-	-

Resistência À Tração: Min. 550 (Mpa),  
 Processos :Tig Ou Mig  
 Apresentação: Ø Vareta/Arame: 1,20mm (Carretel 15 Kg).  
 Quantidade Utilizada: 0,5 Kg  
 Fabricante: Sandvik  
 Corrida: 63752 / Certificado nº 076.028

#### 4.3.3 Aplicações

Resistente a temperaturas de trabalho até 700°C, chapeamento de aços ligados. Possui elevada resistência ao calor e choque térmico.

### 4.4 Instrumentos de Medição

#### 4.4.1 Durômetro de Bancada:

Aplicação: O durômetro de bancada nos permite caracterizar com maior precisão as 3 regiões pós-soldagem, ou seja, o metal de base, a ZAT e o metal de solda em si.

- **DURÔMETRO INSTRON WOLPERT MODELO DIA TESTOR 7022.**



#### 4.4.2 Durômetro Portátil

Aplicação: Ge\ KRAUTKRAMER , Mod. MIC-10 é um durômetro portátil utilizado para promover uma micro endentação que permite caracterizar a dureza, vickers ou brinell nessa região específica, utilizado em conjunto com o padrão de dureza Krautkramer.

#### 4.4.3 Paquímetro Analógico

Aplicação: Medir os diâmetros e comprimento das varetas empregadas e a largura dos passes durante a soldagem. (Mitutoyo, Mod. 530 – 104B-10).

#### 4.4.4 Alicate Volt-Amperímetro

Aplicação: medir a amperagem e a voltagem empregadas durante a soldagem, garantindo os parâmetros da IEIS (Instrução de Execução e Inspeção de Soldagem). (Fab: Minipa, Mod. ET- 3910).

#### 4.4.5 Termômetro Infravermelho

Aplicação: medir temperaturas pré-aquecimento e interpasso durante a soldagem. (Fab.Minipa, Mod. MT-350).

#### 4.4.6 Forno para Tratamento Térmico (Forno de alvenaria- locação: CONFAB EQUIPAMENTOS)

Aplicação: Fornecer as temperaturas adequadas a cada etapa do plano de tratamento térmico previsto na IEIS (Instrução de Execução e Inspeção de Soldagem) e emitir evidências, ou seja, um gráfico baseado nos termopares instalados no forno. Consiste num forno tipo mufla equipado com sensores de temperatura e umidade (Termo-higrômetro Minipa, Mod: MT405, duplo canal, com dois termopares tipo K).

### 5.0 DOCUMENTOS TÉCNICOS / ANEXOS:

- I) INSTRUÇÃO DE EXECUÇÃO E INSTRUÇÃO DE SOLDAGEM
- II) ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM
- III) QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM
- IV) CURVA DE SECAGEM DOS REFRATÁRIOS.
- V) GRÁFICO REAL DAS TRÊS SITUAÇÕES SIMULADAS

## 6.0 AMOSTRAS

*Quantidade de amostras:* 08 (oito) peças em forma de meia cana (Tubo 4" SCH 80, ASTM 335 Gr 9, partido ao meio) medindo 15 mm de comprimento cada:

- 04 (quatro) peças de amostra para *MOCK UP*: soldadas em duas temperaturas diferentes de pré-aquecimento (200°C e 350°C), foram utilizados somente os corpos de prova pré-aquecidos á 200° C por dois soldadores distintos utilizando varetas/arames de (1,2mm) de bitola, do material Ni-CrIII, atendendo documento de soldagem, IEIS, fundamentada na EPS 1792A, todas pertinentes a ASME, div IX, Ed. 2007, procedendo à união por solda em ângulo de uma junta em ângulo com perna de 2 mm X 2 mm entre a meia cana do tubo e a chapa de AISI 310, também com 2 mm de espessura X 10 mm largura X 20 mm de comprimento.

A soldagem foi executada pelo processo TIG, com a menor energia de soldagem possível para que haja fusão satisfatória do consumível. A amperagem (mín. 55 máx. 68 A) e a voltagem (mín. 9 e máx. 11V) aplicadas foram documentadas por um inspetor de soldagem N1 e os valores evidenciados no relatório de acompanhamento de soldagem do mesmo.

### **METODOLOGIA:**

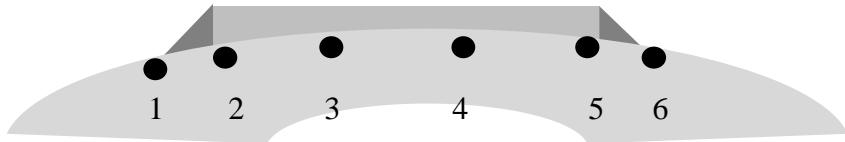
Amostras Intencionais: MOCK-UP da situação real - 3 TRATAMENTOS TÉRMICOS (conforme gráfico).

Observação em Laboratório: Ensaios

- Ataque nital 10% (3 ~7s).
- Micro dureza Vickers Pré Tratamento Térmico
- Macrografia
- Micro dureza Vickers Pós Tratamento Térmico

## 7.0 RESULTADOS & DISCUSSÃO

### 7.1 Dureza: Pré Tratamento Térmico Croqui com 6 Pontos de Medição:



RESULTADOS DOS PONTOS DE IMPRESSÃO

IDENTIFICAÇÃO	1	2	3	4	5	6
CP1-DZ PRÉ 200°C	381	371	381	381	381	362
CP2-D8PRÉ 200°C	381	362	371	321	362	381
CP3-D8 PRÉ 200°C	381	390	390	390	390	390

Ensaios conforme ASTM E92

Escala usada: HB ( HV 10 )

Norma do Projeto ASME B31.3 ED.2007

### 7.2 Macrografias: (Figuras: 18; 19 e 20) com ataque nital á 10% por 3 segundos produziu as seguintes amostras:

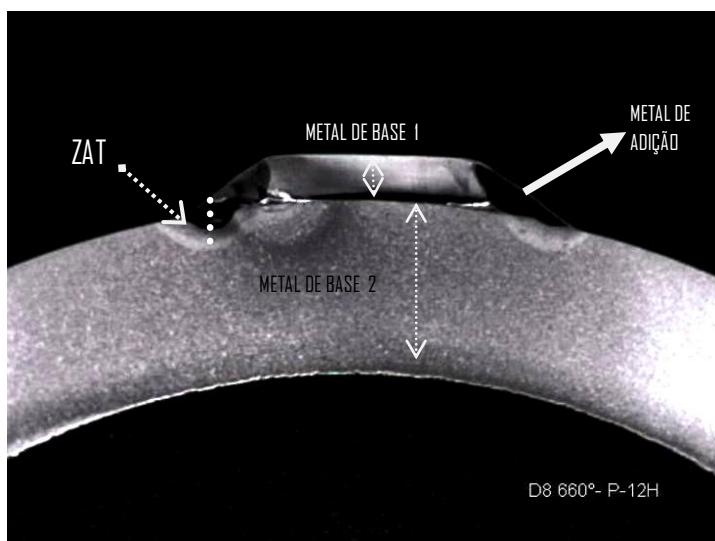


Figura 18: Temperatura de Patamar 660° /12horas (Cp1)

Ataque Nital evidenciou precisamente A ZAT (ZONA AFETADA TERMICAMENTE).

Processamentos Sofridos CP1: Tratamento Térmico 12 horas a 480° C, com o objetivo de verificar sensitivação do AISI 310. Tratamento Térmico 12 horas a 660° C correspondente a secagem

preliminar dos refratários do equipamento em questão. Produziu uma ZAT máxima de 2mm de largura por 4 mm de profundidade, conforme figura 18.

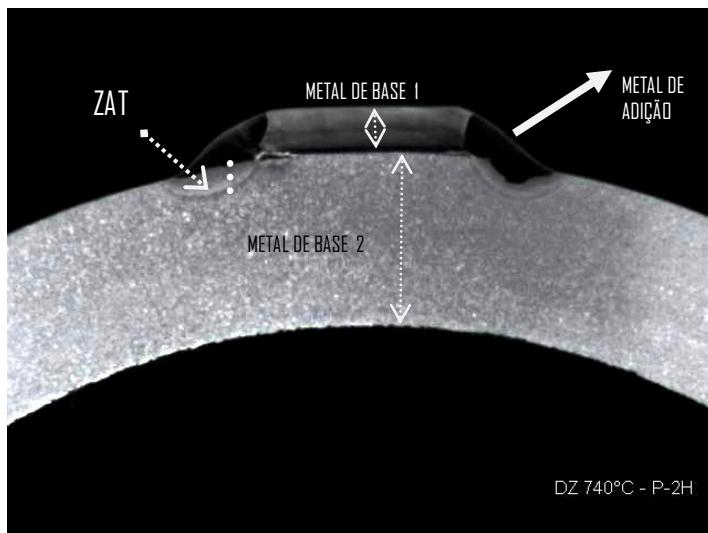


Figura 19: Temperatura de Patamar  $740^{\circ} \pm 10^{\circ}\text{C}$ /2 Horas (Cp2)

Ataque Nital evidenciou precisamente A ZAT (ZONA AFETADA TERMICAMENTE).

Processamentos Sofridos CP2: Tratamento Térmico 12 horas a  $480^{\circ}\text{C}$ , com o objetivo de verificar sensitivação do AISI 310. Tratamento Térmico 2 horas a  $740^{\circ}\text{C}$  correspondente ao Tratamento Térmico previsto na IEIS em questão. Produziu uma ZAT máxima de 1,0mm de largura por 3 mm de profundidade, conforme figura 19.

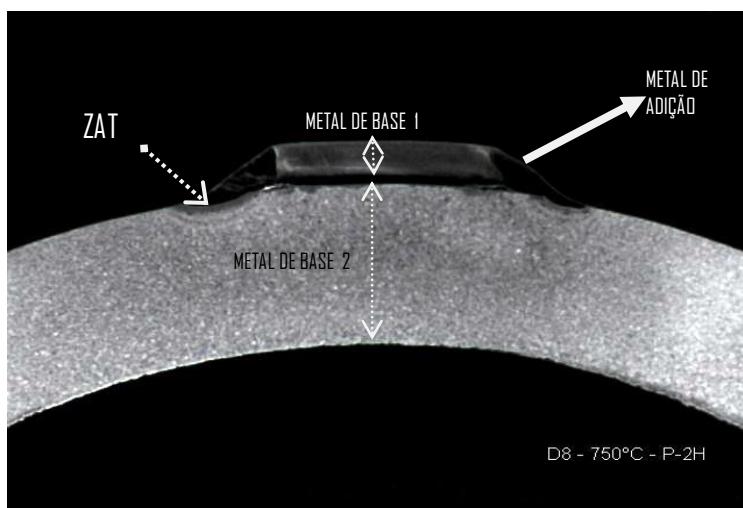


Figura 20: Temperatura de Patamar  $750^{\circ} \pm 30^{\circ}\text{C}$ /2 Horas (Cp3)

Ataque Nital evidenciou precisamente A ZAT (ZONA AFETADA TERMICAMENTE).

Processamentos Sofridos CP3: Tratamento Térmico 12 horas a  $480^{\circ}\text{C}$ , com o objetivo de verificar sensitivação do AISI 310. Tratamento Térmico 2 horas a  $750^{\circ}\text{C}$  correspondente ao Start up do

equipamento, conforme o manual operacional do forno. Produziu uma ZAT máxima de 2,0mm de largura por 3 mm de profundidade, conforme figura 20.

### 7.3 Dureza Pós-Processamentos Supracitados nas Figuras 18, 19 E 20.

PROCESSO: TIG ARAME: NiCr3

NORMA: ASME B31.3 AD.2007

DIAGRAMA DOS PONTOS DE IMPRESSÃO



RESULTADOS DOS PONTOS DE IMPRESSÃO

IDENTIFICAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DZ-740° 2H	247	243	243	237	237	237	180	185	180
D8-660° 12H	264	258	247	231	253	243	185	185	180
D8-750° 2H*	247	237	222	231	237	231	180	185	180

Ensaios conforme ASTM E92

Escala usada: HB ( HV 10 )

\* Também sofreu Tratamento térmico à 480°C por 12H

### DUREZA PRÉ- TRATAMENTO TÉRMICO X DUREZA PÓS-TRATAMENTO TÉRMICO

CP	DUREZA ZAT (HB)	CP	DUREZA ZAT (HB)
CP1 (660°C)	376,16	CP1 (660°C)	227,33
CP2 (740°C)	363	CP2 (740°C)	221
CP3 (750° C)	388,67	CP3 (750° C)	216,67

\*\*os valores são relativos a média das durezas.

Após analisar os resultados obtidos nos 03 corpos de prova, não foi identificada nenhuma discrepância considerável nas durezas médias, (conforme quadro acima) seja no MB , nas ZATs, conforme a IEIS, ou pós-simulação da secagem do refratário, onde apesar da longa exposição á temperaturas de 480° C, não observamos sensitização no AISI 310.

## 8.0 CONCLUSÃO

Não havendo variações significativas nos valores obtidos nos testes de dureza, nos é possível afirmar que o tratamento térmico, apesar de preterido na fase de soldagem pode ser executado com a mesma eficiência durante o processo de secagem do refratário e posterior ignição do forno, garantindo assim os requisitos de soldagem.

Realizar a soldagem numa etapa de fabricação ou simplificar a soldagem na etapa de montagem é uma necessidade para futuros projetos. O uso da etapa de secagem é possível, entretanto não provou ser a mais prática e menos custosa, levando em consideração as restrições de trabalho no que concerne materiais refratários e nas possíveis falhas de processo assim como os trips (FALHAS NO PROCEDIMENTO) de partida.

(Houve problemas no processo de secagem dos refratários (CP1) a aceitação da exceção foi garantida somente no procedimento de partida CP3).

Ao estudar os desenhos de fabricação das serpentinhas da radiação, foi identificada a soldagem de espaçadores em cada um dos módulos e um tratamento térmico subsequente é realizado nas peças que formam cada um dos três módulos da serpentina e que juntos compõe a geometria de harpa da radiação. O Tratamento Térmico é feito em forno de alvenaria instrumentado, o que o simplifica e controla melhor este tipo de processamento.

Mais confiável e controlável e utilizando os espaçadores da serpentina como referência é possível determinar o local preciso da soldagem da instrumentação relativa aos *skin points*, o que nos leva a concluir que esta solução é a mais viável e satisfatória em todos os quesitos.

Então, soldar uma almofada de AISI 310 durante a fase de fabricação que já chega tratada térmicamente no campo, eliminando a soldagem dissimilar nesta fase, economiza desde a diária do gerador para o tratamento térmico, a equipe de segurança, as diárias dos inspetores, dos soldadores, equipe de tratamento térmico, transporte, abastecimento, enfim de todo custo direto e indireto de implementos e mão de obra requerida à realização desta soldagem causando uma economia direta estimada entre R\$500mil~R\$700 mi reais.

A soldagem de almofadas já foi implementada em dois outros projetos semelhantes e foi incorporada ao processo com sucesso. O que prova que a excelência é aplicável em contratos de montagem desde que haja interação multidisciplinar de forma que haja tempo hábil para este tipo de estudo.

*Obs.: Durante este estudo de caso outra situação foi levantada e uma sugestão para otimização do processo foi apresentada a produção.*

Os testes de pressão da serpentina da radiação, apesar de serem executados na fase de fabricação, são também solicitados na fase de montagem.

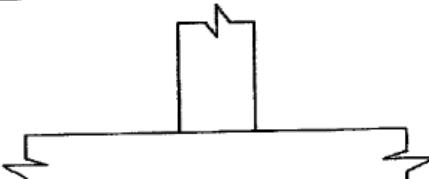
O tamponamento do mani fold (tampa soldada para vedação dos tubos de interligação da serpentina, durante os testes de pressão), é removido de todos os módulos da serpentina pós-teste de

pressão durante a fabricação, entretanto o tamponamento deve permanecer nos módulos que serão montados nas extremidades, visto que pós-montagem, os tampões serão soldados novamente a fim de promover o teste de pressão pneumático solicitado nesta fase, economizando assim vários eventos durante montagem. (FAB: corte e biselamento; MONT: soldagem, corte, biselamento e tratamento térmico, além da economia de material base A335 Gr11, o qual é custoso e com vários requisitos de soldagem.(Agravante: o projeto do forno não prevê válvulas de bloqueio até o reator, fazendo com que as juntas tenham o requisito máximo do projeto(1).

## ANEXOS

## I) INSTRUÇÃO DE EXECUÇÃO E INSTRUÇÃO DE SOLDAGEM / QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

## II) ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

EPS No.: 1792A	DATA: 14/06/2010	QPS No. (s): 1792																	
WPS Nr.	Date	PQR nr (s)																	
REVISÃO: 0	DATA: _____	Por: AOP / ED																	
Revision	Date	By																	
PROCESSO DE SOLDAGEM: GTAW	_____	Por:																	
Welding Process	_____	By																	
Tipo: <input type="checkbox"/> MANUAL Typ Manual	<input type="checkbox"/> SEMI-AUTOMÁTICO Semi-Automatic	<input type="checkbox"/> MECÂNICO Machine	<input type="checkbox"/> AUTOMÁTICO Automatic																
<b>JUNTAS(QW 402) Joints</b> <b>JUNTAS:</b> DE TOPO/butt joint Joints <b>BACKING:</b> SIM/yes Backing <b>MATERIAL:</b> Material GÁS:ARGÔNIO (Ar)																			
<b>CROQUI DA JUNTA:</b> Joint Sketch  OU DE ACORDO COM O PLANO DE SOLDADAS. or in acc. with the welding plan/drawing																			
<b>RETAINERS:</b> _____																			
<b>METAL DE BASE (QW 403) / Metal Base</b> <table border="1"> <tr> <td>P Nr: 5B</td> <td>S Nr: N/A</td> <td>GRUPO Nr: 1</td> <td>For P Nr: 8</td> <td>S Nr: N/A</td> <td>GRUPO Nr: 1/2</td> </tr> <tr> <td>P Nr.</td> <td>S Nr.</td> <td>Group Nr.</td> <td>To P Nr.</td> <td>S Nr.</td> <td>Group Nr.</td> </tr> </table>				P Nr: 5B	S Nr: N/A	GRUPO Nr: 1	For P Nr: 8	S Nr: N/A	GRUPO Nr: 1/2	P Nr.	S Nr.	Group Nr.	To P Nr.	S Nr.	Group Nr.				
P Nr: 5B	S Nr: N/A	GRUPO Nr: 1	For P Nr: 8	S Nr: N/A	GRUPO Nr: 1/2														
P Nr.	S Nr.	Group Nr.	To P Nr.	S Nr.	Group Nr.														
<b>ESPECIFICAÇÃO DO TIPO E GRAU:</b> N/A Specification type and grade <b>POR ESPECIFICAÇÃO DO TIPO E GRAU:</b> N/A To specification type and grade <b>ANÁLISE QUÍMICA E PROPRIEDADE MECÂNICA:</b> N/A Chemical analysis and mechanical property <b>POR ANÁLISE QUÍM. E PROPRIEDADE MEC.:</b> N/A To chemical analysis and mechanical property																			
<b>Aprovado Para</b> <b>Fabricação</b>																			
<b>FAIXA DE ESPESSURA DO METAL DE BASE / Thickness Range of Base Metal</b> <table border="1"> <tr> <td>CHANFRO COM IMPACTO: Groove With Impact</td> <td>Min. 0 mm</td> <td>Máx. 0 mm</td> <td>FILETE: ILIMITADO/UNLIMITED</td> </tr> <tr> <td></td> <td>in</td> <td>in</td> <td>Fillet</td> </tr> <tr> <td>CHANFRO SEM IMPACTO: Groove Without Impact</td> <td>4,7 mm</td> <td>25 mm</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>in</td> <td>in</td> <td></td> </tr> </table>				CHANFRO COM IMPACTO: Groove With Impact	Min. 0 mm	Máx. 0 mm	FILETE: ILIMITADO/UNLIMITED		in	in	Fillet	CHANFRO SEM IMPACTO: Groove Without Impact	4,7 mm	25 mm			in	in	
CHANFRO COM IMPACTO: Groove With Impact	Min. 0 mm	Máx. 0 mm	FILETE: ILIMITADO/UNLIMITED																
	in	in	Fillet																
CHANFRO SEM IMPACTO: Groove Without Impact	4,7 mm	25 mm																	
	in	in																	
Outros: N/A																			
<b>METAIS DE ADIÇÃO (QW 404) / Filler Metals</b> <table border="1"> <tr> <td>F No.: 43</td> <td>OUTROS: N/A</td> <td>A No.: VER SFA 5.14</td> <td>OUTROS: N/A</td> </tr> <tr> <td>F nr.</td> <td>Others</td> <td>A nr.</td> <td>Others</td> </tr> </table>				F No.: 43	OUTROS: N/A	A No.: VER SFA 5.14	OUTROS: N/A	F nr.	Others	A nr.	Others								
F No.: 43	OUTROS: N/A	A No.: VER SFA 5.14	OUTROS: N/A																
F nr.	Others	A nr.	Others																
<b>ESPECIFICAÇÃO No (SFA):</b> 5.14 (GTAW) Specification nr. (SFA) <b>CLASSIF. AWS No.:</b> ER-NiCr3 AWS nr. (class.) <b>CLASSIF. FLUXO-ARAME AWS N°:</b> N/A Wire X Flux-Classification AWS N° <b>MARCA COMERCIAL DO FLUXO:</b> N/A Flux Trade Name <b>INSERTO CONSUMÍVEL:</b> N/A																			
<b>DIÂMETRO DOS METAIS DE SOLDA</b> Size of filler metals 2,4mm (3/32")																			
<b>TIPO-FLUXO:</b> _____ Flux Type <b>ESCORIA REMOÍDA:</b> _____ Recrushed Slag																			
<b>VARETA SÓLIDA OU ALMA METAL/TUBULAR COM FLUXO / PÓ-METÁLICO (GTAW):</b> SÓLIDA Filler Metal Product Form: Bare Solid or Metal Cored , Flux Cored , Powder (GTAW): <b>FAIXA DE ESPESSURA DO METAL DE SOLDA DEPOSITADO:</b> _____ Thickness Range of Welded Metal																			
<table border="1"> <tr> <td>CHANFRO: GTAW &lt;= 10 mm (13/32")</td> <td>FILETE: ILIMITADO/UNLIMITED</td> <td>CurtoCírculo/short circuiting</td> </tr> <tr> <td>Groove</td> <td>Fillet</td> <td>arc:Limite/Limit</td> </tr> <tr> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td></td> </tr> <tr> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td></td> </tr> </table>				CHANFRO: GTAW <= 10 mm (13/32")	FILETE: ILIMITADO/UNLIMITED	CurtoCírculo/short circuiting	Groove	Fillet	arc:Limite/Limit	N/A	N/A		N/A	N/A					
CHANFRO: GTAW <= 10 mm (13/32")	FILETE: ILIMITADO/UNLIMITED	CurtoCírculo/short circuiting																	
Groove	Fillet	arc:Limite/Limit																	
N/A	N/A																		
N/A	N/A																		
<b>OUTROS:</b> MARCA COMERCIAL/ TRADE MARK: VARETA/ rod: NICRO A - KESTRA Others:																			
<b>POSIÇÕES (QW 405) / Positions</b> <b>Posição(s) do chafro:</b> TODAS Position(s) of groove		<b>PRÉ-AQUECIMENTO(QW 406) / Preheat</b> Temp. Pré-Aquec.: 16°C (62°F)(A1) 200°C(392°F)(CrMo) Preheat temperature (MÍN) Temp. de Interpasses: 150°C (302°F) 300°C (572°F)(CrMo) Interpass Temperature (MÁX) <b>Manutenção do Pré-Aquecimento:</b> SIM/yes Maintenance preheat																	
<b>Progressão de soldagem:</b> Asc.: SIM/yes Welding Progression: Up Dese.: N/A Down		<b>DURANTE À SOLDAGEM /during the welding</b> <input checked="" type="checkbox"/>																	
<b>Posição(s) do flete:</b> TODAS																			

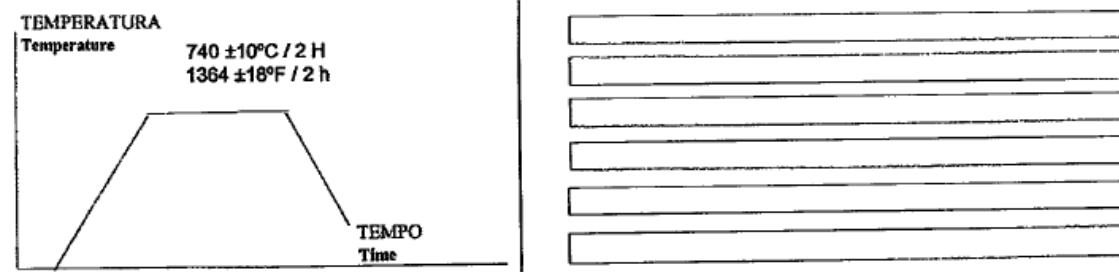
## \*TRATAMENTO TÉRMICO (QW 407) / Postweld Heat Treatment

EPS No.: 1792A

Wps Nr.

## TEMPERATURA

Temperature

740 ±10°C / 2 H  
1364 ±18°F / 2 h

## GÁS (QW 408) / Gas

GÁS(ES)  
Gas(es)COMPOSIÇÃO do GÁS / MISTURA:  
Gas/ Mixture Composition:VAZAO:  
Flow rate:PROTEÇÃO:  
Shielding

ARGÔNIO (Ar)

99,99%

10-15 l/min..

TRAILING:  
Trailing:

N/A

N/A

N/A

BACKING  
Gas Backing

15-20 l/min.

N/A

N/A

## CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS (QW 409) / Electrical Characteristics

DIÂMETRO DO ELETRODO DE TUNGSTÉNIO E TIPO: EWTh 2 Ø 3,2mm (1/8")

Tungsten electrode size and type

MODO DE TRANSFERÊNCIA DE METAL (GMAW/FCAW): N/A

Mode of Metal Transfer for GMAW

FAIXA DE VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME: N/A

Wire feed speed range

PROCESSO Process	CAMADAS Layers	MATERIAL DE ADIÇÃO Filler Metal			INTENSIDADE CORRENTE Current (A)	POLARIDADE Polarity	TENSÃO Tension (V)	VELOC. Speed Range CM/MIN (IN/MIN)	Calor Imposto (KJ/cm)MAX Heat Input (KJ/in)MAX
		AWS/MARCA	Ø (MM)	Ø (IN)					
GTAW	VARIAS	ER-NiCr3	2,4	3/32	60 - 120	CC(-)	10-15	5 - 15	

OUTROS: PEENING: N/U

Others

## TÉCNICA (QW 410) / Technique

FILETADO OU TRANÇADO: TRANÇADO E/OU FILETADO/string and/or weave bead

String or weave bead

ORIFÍCIO OU TAMANHO DO FURO PARA SAÍDA DE GÁS: 10mm (3/8")

Orifice or gas cup size

MÉTODO DE LIMPEZA: ESCOVAGEM E/OU ESMERILHAMENTO/brushing and/or grinding

Method of cleaning

MÉTODO DE GOIVAGEM: N/A

Method of back gouging

OSCILAÇÃO: N/A

Oscillation

DISTÂNCIA TUBO X PEÇA: N/A

Stickout (Contact Tube to Work Distance)

UM OU MÚLTIPLOS PASSES POR LADO: MULTIPLOS/multiple

Multiple or single pass per side

ELETRODOS SIMPLES OU MÚLTIPLOS: SIMPLES/single

Multiple or single electrode

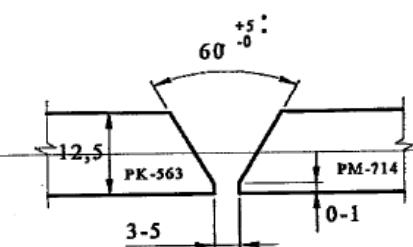
MARTELAMENTO N/A

Penning

Teste de Impacto/Impact Test: N/A

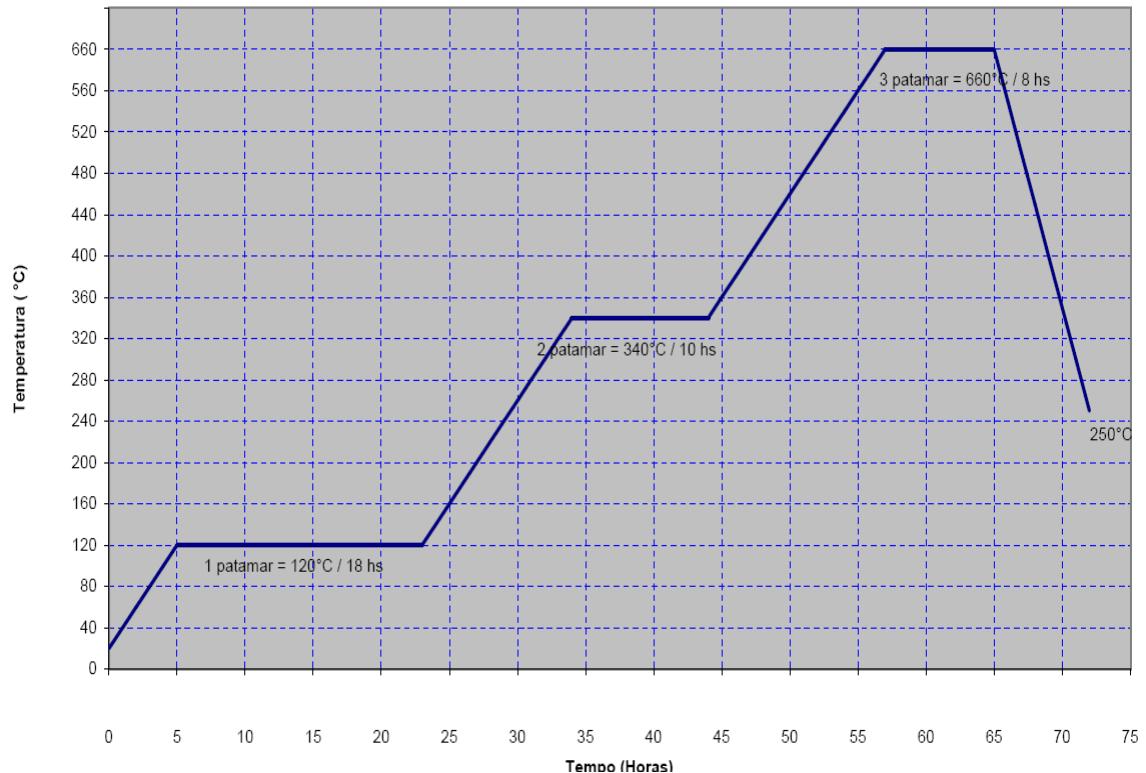
OUTROS/Others:

### III) QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

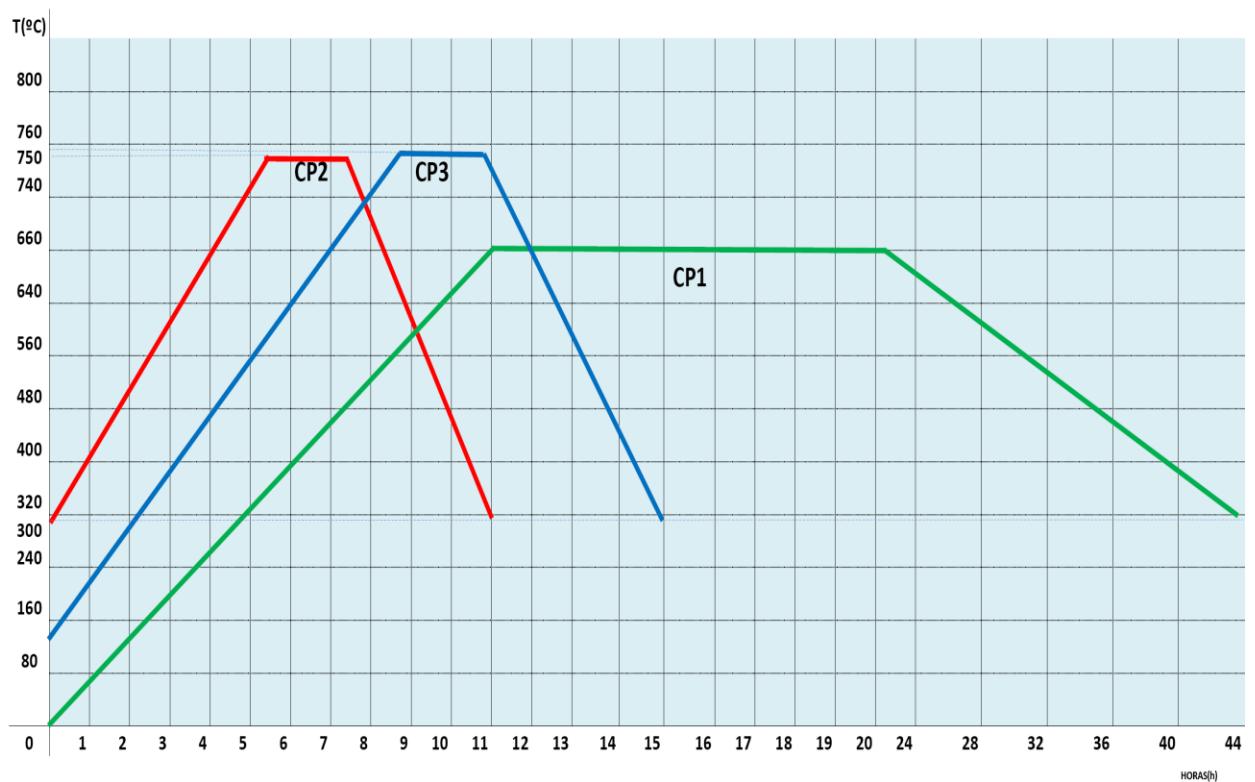
QPS Nº: 1792 POR Nr DATA: 22/11/99 Date PROCESSO DE SOLDAGEM: GTAW + SMAW Welding Process TIPO: MANUAL Type	EPS Nº: 1792 WPS Nr RESPONSÁVEL: ED/NN Responsible
<b>JUNTAS (QW 402)</b> JOINTS	<b>METALOGRAFIA</b> METALLOGRAPH ESPESSURA MÁXIMA DE CADA PASSE: 13mm maximum thickness of each weld pass: 1/2"
	<b>Aprovado</b> <b>P/ fabricação</b>
	<input type="checkbox"/> BRINELL <b>DUREZA</b> <small>Hardness</small> <input checked="" type="checkbox"/> VICKERS (HV 10 ) <input type="checkbox"/>
<b>METAIS DE BASE (QW 403)</b> BASE METALS	<b>TRATAMENTO TÉRMICO (QW 407)</b> <small>POSTWELD HEAT TREATMENT</small> <b>TEMPERATURA:</b> 740 °C ± 10 (1364 °F ± 18 ) <small>temperature</small> <b>TEMPO:</b> 4 h <small>Time</small> <b>OUTROS:</b> N/A <small>Others</small>
<b>ESPECIFICAÇÃO MATERIAL:</b> SA-387 + SA-240 <small>Specification material</small> <b>TIPO E GRAU:</b> Gr 5 + TP 304 <small>Type or Grade</small> <b>P Nº:</b> S.B1 <b>POR P Nº:</b> 8.1 <small>to P Nr</small> <b>ESPESSURA CORPO DE PROVA:</b> 12,5 mm (1/2") <small>Thickness of test coupon</small> <b>DIÂMETRO CORPO DE PROVA:</b> N/A <small>Diameter of test coupon</small> <b>OUTROS:</b> N/A <small>Others</small>	<b>GAS (QW 408)</b> <small>Gas</small> <b>TIPO DE GAS(ES):</b> ARGÔNIO / ARGON <small>Type of gas(es)</small> <b>COMPOSIÇÃO DE MISTURA:</b> 99,99 % <small>Composition of gas mixture</small> <b>OUTROS:</b> VAZAO: 10 @ 15 l/min. <small>Others</small>
<b>METAIS DE ADIÇÃO (QW 404)</b> <b>FILLER METALS</b> <b>ANALISES DO METAL DE SOLDA A Nº:</b> 43 <small>Weld metal analysis a Nr</small> <b>DIÂMETRO METAL DE ADIÇÃO:</b> 2,4 / 3,2 mm (3/32" ; 1/8") <small>Size of filler metal</small> <b>METAL DE ADIÇÃO F Nº:</b> GTAW: 6, SMAW: 4 <small>Filler metal F Nr</small> <b>ESPECIFICAÇÃO SFA:</b> GTAW: 5.14, SMAW: 5.11 <small>SFA Specification</small> <b>CLASSIFICAÇÃO AWS:</b> ER-NiCr-3 , E-NiCrFe-2 <small>AWS Classification</small> <b>OUTROS:</b> MARCA COMERCIAL: (VARETA/rod) NICKRO A - KESTRA <small>Others</small> <b>ELET. REVESTIDO(Covered electrode):</b> W.L. WELD A - WELD INOX <b>METAL DEPOSITADO:</b> GTAW : 5,0 mm (0,196 in ) <small>Weld Metal</small> <b>SMAW :</b> 7,5 mm (0,295 in ) <small>Weld Metal</small>	<b>CARÁTER. ELÉTRICAS (QW 409)</b> <small>CHARACTER. ELECTRICAL</small> <b>CORRENTE:</b> CC / DC <small>Current</small> <b>POLARIDADE:</b> (-) (GTAW) / (+) (SMAW) <small>Polarity</small> <b>AMPERES:</b> GTAW: 100 - 110A; SMAW: 110 - 120 A <small>Amps</small> <b>VOLTS:</b> GTAW: 11 - 13V / SMAW: 22 - 28V <small>Volts</small> <b>DIÂMETRO DO ELETRODO TUNGSTÊNIO:</b> AWS EWTh-2 Ø 3,2 mm <small>Tungsten electrode size</small> <b>OUTROS:</b> N/A <small>Others</small>
<b>POSIÇÃO (QW 405)</b> <b>POSITION</b> <b>POSIÇÃO DO CHANFRO:</b> 3G <small>Position of groove</small> <b>PROGRESSÃO DE SOLDAGEM:</b> ASCENDENTE /UP <small>Weld Progression</small> <b>OUTROS:</b> N/A <small>Others</small>	<b>TECNICAS (QW 410)</b> <small>Technique</small> <b>VELOCIDADE:</b> GTAW: 7 - 10 cm/min. / SMAW: 8 - 13 cm/min. <small>Travel speed</small> <b>FILETADO OU TRANÇADO:</b> FILETADO / string <small>String or weav bead</small> <b>OSCILAÇÃO:</b> MÁX. 3 x DIAM. ALMA /max. 3 x electrode core <small>Oscillation</small> <b>SIMPLÉS OU MÚLTIPLOS PASSES POR LADO:</b> MÚLTIPLOS <small>Simple or multiple passes (per side)</small> <b>SIMPLÉS OU MÚLTIPLOS ELETRODOS:</b> SIMPLÉS / single <small>Single or multiple electrodes</small> <b>OUTROS:</b> PEENING:N/U <small>Others</small>

20/11/99

#### IV) CURVA DE SECAGEM DOS REFRATÁRIOS.



#### V) GRÁFICO DAS TRÊS SITUAÇÕES SIMULADAS



## LEGENDA

TEMPERATURA PATA-MAR (°C)	TEMPO DE PATA-MAR (HORAS)	TEMP. INICIO DE CONTROLE (°C)	TEMP. FIM DE CONTROLE (°C)	GRADIENTE (°C/H)	EVENTO	FASE DO PROJETO	
CP 1	660	12	0	300	50	SECAGEM PRELIMINAR DOS REFRATÁRIOS	CONDICIONAMENTO
CP 2	740	2	300	300	100	PÓS SOLDAGEM	MONTAGEM
CP 3	750	2	100	300	100	PRÉ PARTIDA	COMISSIONAMENTO

## BIBLIOGRAFIA

### NORMAS:

API 556, A. (May de 1997). Instrumentation and Control Sistems for fire Heaters and Steam Generators. 1<sup>a</sup> Ed.

Petrobrás. (s.d.). N-115 , rev.E. *Tubulações* .

Petrobrás. (s.d.). N-133 , rev J.

ASME B31.3. *Process Pipping* . Ed.2007

ASME B31.1. *Power Pipping* . Ed.2004

ASTM E 92 Ensaio de Dureza

### LIVROS:

Callister, W. (1991). *Materials science and Engeneering An Introduction*. New york: John Willay & sons, Inc.

Callister jr, W. D. (2005). *Fundamentos da ciéncia e engenharia dos Materiais*. 2<sup>a</sup> Ed. completa e Integrada: Ed. LTC.

Marques, P., & Bracanense, P. m. (2005). *Soldagem - Fundamentos e Tecnologia*. Belo Horizonte: UFMG Ed. Didática.

Teles, P. S. (2001). *Tubulações Industriais - Materiais ,Pprojeto e Montagrm*. 10<sup>a</sup> Edição: Ed. LTC.

### SITES:

Cavalli, A. (25 de 01 de 2012). Apostila de Engenharia de Materiais,Unianchieta(xa.yimg.com/kq/groups/21784460/1107250801/name/ACOS). Jundiaí, São Paulo , Brasil.

Cleber Fontes, Engº Metalúrgico. (15 de 04 de 2004). *Apostila Metalurgia Soldagem(1901102rev0)*. Acesso em 31 de 05 de 2012, disponível em [www.esab.com.br](http://www.esab.com.br).

Folder técnico Favorit. (ed 11 de 2011). <http://www.favorit.com.br/produtos/categoria/acos-inoxidaveis/aco-aisi-310>. Acesso em 12 de 06 de 2011, disponível em [www.favorit.com.br](http://www.favorit.com.br).

### PROCEDIMENTOS EXCLUSIVOS DO EQUIPAMENTO:

Secagem Preliminar do Revestimento Refratário, Allan Otremba, Jul 2010, rev0.

**CURSOS PETROBRÁS DE ANÁLISE DE FALHAS:**  
Eng<sup>a</sup>. Neyde A. F. Marques - CENPES

- Mecanismos de Fragilização;
- Casos Particulares de Fadiga;
- Corrosão sob Tensão; Fragilização por Hidrogênio;
- Ductilidade e Fratura Dúctil;
- Fratura Frágil e Corrosão sob Tensão API e
- Processo de Coqueamento Fracionado.

**ARTIGOS PETROBRÁS:**

- Análise de Corrosão de um Aço Carbono por Técnica Fotoacústica. (L. A. Matlakhova (1), A. N. Matlakhov (1), G.E.M. Póvoa (1), S. N. Monteiro (1), C. J. B. M. Joia(2), J. C. R. Plácido Universidade Estadual do Norte Fluminense, Av. Alberto Lamego 2000, Horto, CEP 28015-620, Campos dos Goytacazes, RJ, UENF (2) Centro de Pesquisa da Petrobrás, Cidade Universitária, Qd. 7, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, CENPES.
- Avaliação Comportamental em Corrosão sob Tensão de Aço Inoxidável Austenítico, em Meios Contendo Cloretos, Na Temperatura Ambiente V. B. Nolasco(1), L. C. Cândido(2),(1)Eng. Metalurgista, Mestrando da REDEMAT (UFOP/CETEC/UEMG). (2)Dept Eng. Metal. e de Materiais/EM/Campus da UFOP 35400-000 Ouro Preto/MG.
- Fragilização por Hidrogenio em Tubo de Aço para Óleo e Gás. Benedito Carlos Cavalheiro, Edson Vasques Moreira , Luiz Francisco de Oliveira, Sérgio Ricardo P. Ferreira Confab Industrial S A, Av. Gastão Vidigal Neto, 475, CEP 12414-020, Pindamonhangaba, SP.
- Aspectos Gerais da Oxidação a Alta Temperatura ao Ar de Ligas Fe-Ta. Marcelo de Castro-Rebello(1), Jefferson Caponero(1), Celso Cláudio Perego(2) & Stephan Wolynec(1) (1)Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais / Escola Politécnica da USP .Av. Prof. Mello Moraes, 2.463 / CEP 05508-900 / São Paulo – SP.
- Corrosion of 304 Stainless Steel Exposed To Nitric Acid - Chloride Environments D.G. Kolman, D.K. Ford, D.P. Butt, and T.O. Nelson Materials Corrosion and Environmental Effects Laboratory, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545.
- Experiência de Campo na Avaliação da Corrosão Interna de Oleodutos Terrestres : Estratégias E Técnicas Utilizadas. P. A. Ferreira (1) ,C. V. M. Ferreira (2), D. G. Peixoto (3), E. D. C.da Silva (3), H. A. S.Junior (4) (1) Petrobras/CENPES, Cidade universitária qd 7, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, RJ (2) Fundação COPPETEC, Cidade universitária CT bloco H, CEP 21949-900, Rio de Janeiro, RJ (3)Petrobras/E&P-RNCE/GELOG/GEMAN, Natal, RN (4)Petrobras/E&P, Av. Chile, Rio de Janeiro, RJ.