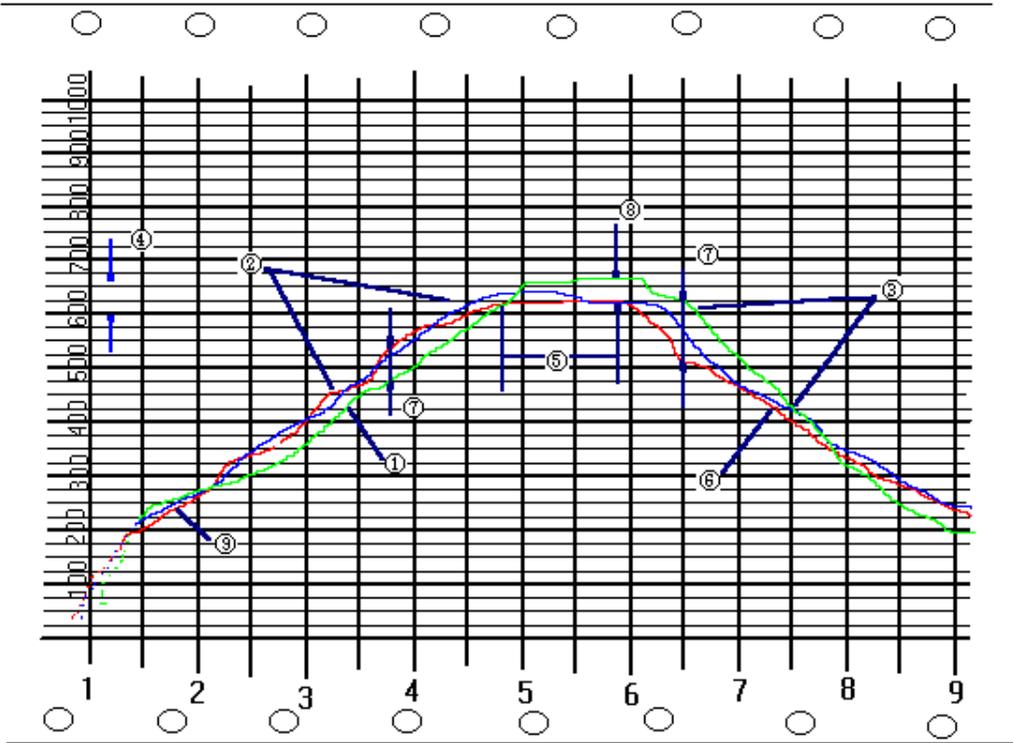


# TRATAMENTO TÉRMICO EM JUNTAS SOLDADAS

EDIÇÃO 1997

LUIZ GIMENES JR.



# ÍNDICE

<b>1.Descrição</b>	<b>3</b>	<i>5.2 Determinação da Taxa de Aquecimento (TA)</i>	<i>27</i>
1.1 Tipos de Tratamento Térmico	3	<i>5.3 Determinação da Temperatura e Tempo de Patamar</i>	<i>27</i>
1.2 Tensões Residuais	6	<i>5.4 Determinação da Taxa de Resfriamento</i>	<i>28</i>
1.3 Hidrogênio	8	<i>5.5 Determinação da Redução de Temperatura de Patamar</i>	<i>28</i>
<b>2. APLICAÇÕES</b>	<b>9</b>	<i>5.6 Tratamento Térmico em duas ou mais etapas</i>	<i>28</i>
2.1 Aços ao Carbono	9	<i>5.7 Recomendações e Cuidados</i>	<i>28</i>
2.2 Aços Baixa Liga	10	<i>5.8 Tratamentos Localizados</i>	<i>29</i>
2.3 Aços inoxidáveis	10	<i>5.9 Registros e Controle de temperatura</i>	<i>30</i>
2.4 Ligas de Níquel	11	<b>6. Tabelas de Cálculo</b>	<b>30</b>
2.5 Ligas de Titânio	12	<i>TABELA 6.1 - TAXAS DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO</i>	<i>30</i>
2.6 Ligas de Magnésio	12	<i>TABELA 6.2 TEMPERATURAS E TEMPOS DE PATAMAR</i>	<i>31</i>
2.7 Ligas de Cobre	12	<i>TABELA 6.3 REDUÇÃO DE TEMPERATURAS DE PATAMAR</i>	<i>31</i>
2.8 Ligas de Alumínio	13	<i>6.4 TABELAS DE PARAMETROS DE TTAT CONFORME NORMAS INTERNACIONAIS</i>	<i>32</i>
2.9 Juntas Soldadas com Metais Dissimilares	14	<b>7. Exemplo de Cálculo de Tratamento Térmico de Alívio de Tensões e Análise de Gráfico</b>	<b>33</b>
2.10 Ferro Fundido	17	<b>8. Formulários</b>	<b>35</b>
<b>3. EQUIPAMENTOS</b>	<b>18</b>	<b>9. Bibliografia</b>	<b>38</b>
3.1 Termopares	18		
3.2 Registradores Gráficos de Temperatura	18		
3.3 Cabos de Compensação	19		
<b>4. Métodos de Tratamento Térmico</b>	<b>19</b>		
4.1 Fornos Fechados	20		
4.2 Aquecimento Resistivo	20		
4.3 Aquecimento Indutivo	21		
4.4 Gases Quentes	21		
4.5 Queimadores a Gas	22		
4.6 Dispositivos Vibratórios	22		
4.7 Martelamento	22		
4.8 Técnicas de Reparo sem TTAT	23		
<b>5.Procedimento de Cálculo de Alívio de tensões</b>	<b>24</b>		
5.1 Determinação da Espessura Nominal (En)	24		

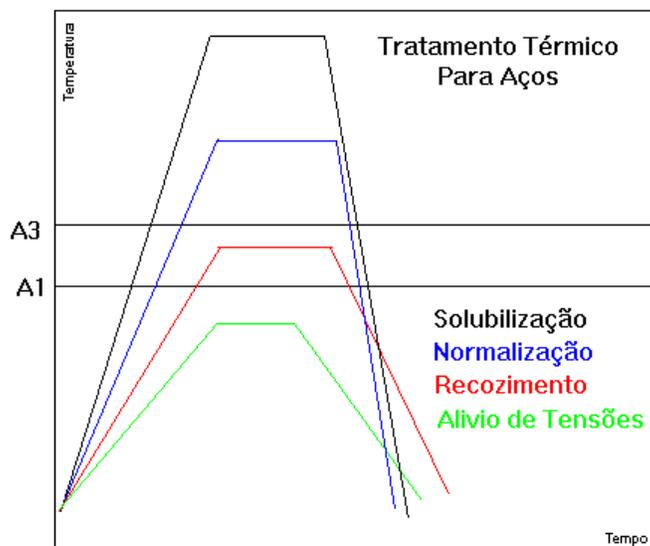
## 1. Descrição

O Tratamento Térmico em metais é conjunto de operações envolvendo aquecimento, tempo de permanência em determinadas temperaturas e resfriamento sob condições controladas, com o objetivo de melhorar as suas propriedades ou conferir-lhes características pré - determinadas.

### 1.1 Tipos de Tratamento Térmico

Os principais Tratamentos Térmicos, ilustrado na **Figura 1.1**, associados às operações de soldagem são:

- Recozimento;
- Normalização;
- Têmpera;
- Revenimento;
- Solubilização;
- Alívio de Tensões;
- pré-aquecimento;
- Pós-aquecimento.



**Figura 1.1** Gráficos de Tratamento Térmico mais usuais após Soldagem

#### a) Recozimento

Consiste no aquecimento da peça até uma temperatura onde haja recristalização e/ou a transformação em uma nova fase.

Para os aços, a permanência na temperatura de patamar durante um determinado tempo seria para homogeneizar a austenita, seguido de resfriamento lento, geralmente no próprio forno. Os principais objetivos a serem alcançados por este Tratamento são:

- Reduzir a dureza do metal;
- Melhorar a usinabilidade;
- Remover o encruamento;
- Aliviar tensões internas;
- Homogeneizar a microestrutura de peça;

O tratamento de recozimento é o segundo mais utilizado dentre os tratamentos térmicos apresentados.

### **b) Normalização**

É um tratamento para aços que consiste em aquecimento a uma temperatura um pouco acima da austenitização, e resfriamento em ar, com o intuito de refinar o grão, aumentando sua resistência mecânica.

### **c) Revenimento**

É um tratamento para aços que consiste no aquecimento da peça com temperaturas entre 450 a 750 °C, permanecendo no forno com períodos de 30 minutos a 4 horas, seguido de resfriamento controlado.

O revenimento é um tratamento térmico aplicado a peças nas quais tenham sido produzidas microestruturas martensíticas, quando se deseja alcançar os seguintes objetivos.

- aliviar tensões internas;
- aumentar a tenacidade (diminuir a fragilidade)

Em algumas ligas de alumínio faz-se um envelhecimento, com temperaturas de 100 a 200 °C, usado para restaurar a ZTA aumentando a resistência mecânica, que foi afetada pela solda deixando a região menos dura.

### **d) Solubilização**

É um Tratamento Térmico que faz uma solução no estado sólido de elementos que anteriormente estavam precipitados, seguido de resfriamento rápido, o suficiente para reter na matriz os elementos na solução, antes precipitados.

### **e) Têmpera**

Consiste no aquecimento da peça até uma determinada temperatura, para austenitização do aço, permanência nesta temperatura durante um determinado tempo para homogeneização da austenita, seguido de resfriamento rápido.

São os seguintes os objetivos da têmpera:

- Endurecer;

- Aumentar a resistência mecânica;
- Aumentar a resistência ao desgaste;
- Aumentar a resistência ao escoamento.

A peça temperada fica muito frágil, sendo necessário, obrigatoriamente, a aplicação do revenido após a têmpera. Esse conjunto de operações, Têmpera e Revenimento dá-se o nome de Beneficiamento.

#### **f) Préaquecimento**

Apesar de ser uma fonte de calor adicional introduzida na peça, quando se executa uma soldagem, muitos não consideram como um Tratamento Térmico.

O aquecimento pode muitas vezes ser feito em uma faixa que varia de 6 a 12 vezes a espessura da peça, o aquecimento pode ser obtido por vários métodos descritos no item 4, o pré aquecimento tem o objetivo de diminuir a velocidade de resfriamento de uma junta soldada, diminuindo tensões residuais, comentada no item seguinte.

O préaquecimento em metais com alta condutibilidade térmica, facilita as operações de soldagem.

Em aços favorece a difusão do hidrogênio, reduz a ocorrência de ZTA com altos níveis de dureza.

Os principais parâmetros para especificar um préaquecimento são: a espessura da peça, natureza composição química e condições metalúrgicas do metal, e o nível de restrição a que a junta está sendo submetida, também o processo de soldagem e seu aporte de energia são variáveis importantes.

#### **g) Pós-Aquecimento**

A principal utilização do pós-aquecimento, é a eliminação de hidrogênio induzido por processos de soldagem, aplicados em aços ao Carbono e Baixa Liga.

Consiste em aquecer a junta soldada em temperaturas na ordem de 250 a 400 °C por 1 a 4 horas, imediatamente após a soldagem, aproveitando o préaquecimento.

As temperaturas e os tempos são diretamente proporcionais à quantidade de liga do material e da espessura.

Na maioria dos casos este aquecimento não provoca alívio de tensões, salvo em materiais onde sofreram têmpera ou são suscetíveis a ela, o pós aquecimento pode influenciar em um abaixamento de dureza, caso as temperaturas e os patamares de revenimento do material fiquem próximas as do pós-aquecimento.

#### **h) Alívio de Tensões**

O tratamento térmico de alívio de tensões, é o mais empregado de todos os estudados do assunto, e será tratado mais profundamente, nos capítulos a seguir.

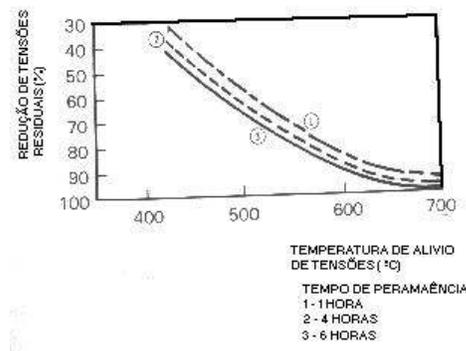
Este tratamento para aços envolve aquecimento abaixo da temperatura crítica de transformação, permanecendo por um período de tempo, geralmente proporcional a espessura seguido de resfriamento lento, permitindo desta forma reduzir as tensões prejudiciais um limite mínimo e aceitável, provocados pelas operações de soldagem, ou mesmo de conformação.

Não confundir a operação de alívio de tensões com tratamentos de recozimento, onde as temperaturas são bem mais elevadas, acima da temperatura crítica de transformação do material, mas que também reduzem as tensões internas.

Os benefícios maiores do alívio de tensões são:

- Aumentar a ductilidade
- Diminuir a dureza
- Melhorar as condições metalúrgicas da ZTA.

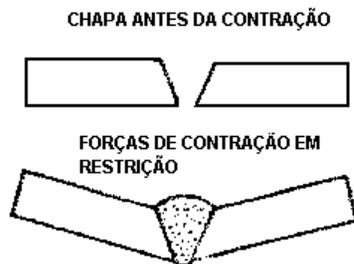
O alívio de tensão depende fundamentalmente da temperatura e do tempo de permanência, também deve-se levar em consideração a resistência mecânica e a composição química, a **Figura 1.2.h** mostra-se como é este comportamento para aços, as tensões são eliminadas diretamente proporcional à temperatura e ao tempo de permanência.



**Figura 1.1.h Influência do Tempo e Temperatura de Patamar no Alívio de Tensões (Fonte Welding Handbook vol 1)**

## 1.2 Tensões Residuais

O aquecimento localizado provocado nas adjacências de uma junta soldada, geram tensões de tração e compressão, a **Figura 1.3.a** ilustra uma junta deformada após soldagem.



**Figura 1.2.a Junta Deformada**

Outra forma de induzir tensões a níveis indesejáveis em um corpo é através da deformação a frio como por exemplo a calandragem além da relação

diâmetro/espessura permitida por norma, relaciona-se abaixo os requisitos do ASME VIII div, muito empregado na indústria.

Partes de Vasos sujeitas a pressão que tenham um alongamento na fibras externas superior a 5%, para materiais em aço carbono ( P no. 1) acima de 40%, devem ser aliviadas tensões antes de outras operações, e caso um ou mais requisitos relacionados abaixo for aplicável:

- a) A temperatura da peça durante a conformação ficou entre 120 a 480 °C.
- b) O material submetido a conformação tem exigência de Teste de Impacto.
- c) A espessura da chapa antes de conformar é superior a 15,8 mm.
- d) O vaso irá trabalhar com substâncias letais ao ser humano.
- e) Houve redução de espessura superior a 10% da chapa.

O alongamento pode ser obtido pela seguinte fórmula:

onde:

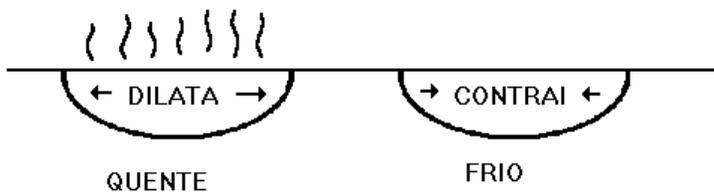
e = Espessura da Chapa

Rf= Raio Final

Ri= Raio Inicial, adotar Ri= 8 para chapa plana

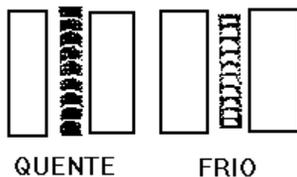
$$D = \left(1 - \frac{R_f}{R_i}\right) \left(\frac{50e}{R_f}\right)$$

Na soldagem o fenômeno da indução de tensões, pode ser descrito como por uma deposição de um cordão de solda sobre chapa. A poça de fusão e a fonte de calor juntos provocam um aquecimento localizado na região, a massa sob a ação da fonte de calor XY, tenderá a se expandir, o metal quente é relativamente dúctil e portanto as tensões de compressão causará deformação local no metal quente, ver **Figura 1.2.b**.



**Figura 1.2.b Cordão Sobre Chapa**

As adjacências resistem a essa expansão e impedem que a seção se expanda, a medida que a poça de fusão esfria o metal quente contrai e tensões de compressão são anuladas e em seguida transformam-se em tensões de tração acarretando o aparecimento de tensões de tração no metal frio, **Figura 1.2.c**.



### Figura 1.2.c Codão de Solda Quente e Frio

Estas tensões internas podem alcançar altos valores. Isto pode causar distorções na estrutura como um todo, mas, o importante, é que isso pode levar as trincas na região próxima a solda se o metal que está sujeito a essas tensões é insuficientemente dúctil para absorver as tensões por deformação.

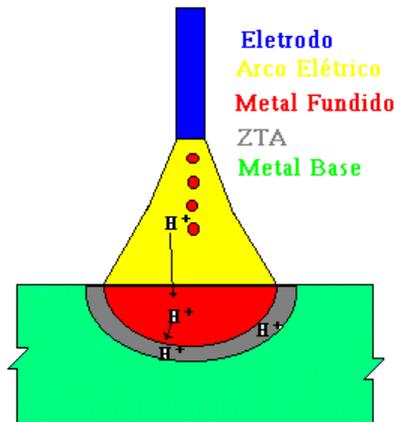
Associado ao préaquecimento os tratamentos de Alívio de Tensões e Recozimento, fazem com que as tensões internas sejam diminuídas.

### 1.3 Hidrogênio

Os gases mais comuns encontrados em operações de soldagem são: oxigênio, nitrogênio, argônio, hélio, dióxido de carbono e hidrogênio. Os dois primeiros oriundos da atmosfera, argônio, hélio e o dióxido de carbono são usados como gases de proteção. **Quando na soldagem de aço carbono e baixa liga**, o hidrogênio, no entanto, requer uma consideração especial, por causa de seu efeito, podendo ser desastroso.

O hidrogênio pode ser oriundo de gases combustíveis, umidade ou graxas. A umidade está presente, em fluxos e revestimentos de eletrodos.

Sendo o hidrogênio muito menos solúvel no metal no estado sólido do que no estado líquido, há supersaturação quando o metal de solda solidifica-se. Um excesso de átomos de hidrogênio, com um raio atômico reduzido pode facilmente difundir na rede cristalina do metal até alcançar a ZTA, caso o gás dissociado encontra algum poro ou descontinuidade na estrutura cristalina do metal, eles se combinam com grande vigor e exercem uma pressão muito grande nos átomos da rede cristalina. O aço tem duas escolhas: ou se deforma caso o aço seja dúctil ou trinca se ele for duro e frágil, como é na forma martensítica, a **Figura 1.3.a** ilustra o fenômeno.



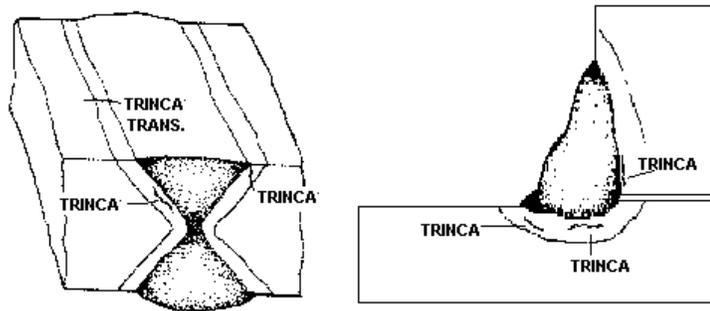
**Figura 1.3.a Fenômeno de Difusão do Hidrogênio**

A combinação martensita, hidrogênio e tensões, deve ser evitada a todo custo.

Um problema muito comum aos profissionais de soldagem, são processos de soldagem que induzem quantidades de hidrogênio consideráveis em uma junta soldada, já que para a eliminação deste gás, pode ser feito pelo aquecimento das peças a serem

sodadas, uma boa prática é executar o alívio de tensões imediatamente após as operações de soldagem, não permitindo a peça ter um resfriamento intermediário ao tratamento térmico de alívio de tensões, aproveitando o préaquecimento dado, outra maneira já tratada anteriormente é a prática do pósaquecimento.

Estas são as melhores alternativas quando soldamos materiais base temperáveis, a **Figura 1.3.b** mostra como que as trincas se localizam, quando temos trincas por hidrogênio, também chamadas de trinca a frio.



**Figura 1.3.b** Localização de Trincas a Frio

## 2. APLICAÇÕES

### 2.1 Aços ao Carbono

Na soldagem de aços carbono devem ser tomadas uma série de medidas, a fim de se obter um resultado satisfatório, uma das operações que além de encarecer o produto, e alongamento do tempo de fabricação mas imprescindível é o préaquecimento.

O préaquecimento em aços Carbono, normalizados pelo SAE, utilizando-se os processos de soldagem SMAW, GMAW, FCAW, e com um menor rigor (pode-se utilizar temperaturas mais baixas) os processos SAW e GTAW, pois tem aporte de calor mais elevados, e como um dos princípios do préaquecimento é diminuir a velocidade de resfriamento, e o aporte de calor faz com que a taxas de resfriamento são diminuídas, pode-se usar temperaturas inferiores às sugeridas na **Fórmula 2.1** abaixo:

$$Pa = 500(C - 0,10) + 0,7e$$

Onde:

Pa= Temperatura de Préaquecimento em °C

e= espessura em mm

C= % em Carbono do Aço

Validade:

Maateriais: SAE 1020 à 1065

Espessuras: Acima de 25 até 300 mm

## 2.2 Aços Baixa Liga

As Tabelas 2.9.a à 2.9.d podem ser usadas para o desenvolvimento de parâmetros iniciais de préaquecimento e alívio de tensões, inclusive para as suas várias combinações.

A soldagem dos aços baixa liga requerem cuidados especiais, pois são materiais temperáveis, por causa da adição de elementos de liga, os principais são Cr, Mo, Ni, V, além do C, e tem suas ZTA suscetível ao endurecimento, geralmente as faixas de préaqueciemnto são mais elevada que os aços ao carbono.

Para os aços de construção mecânica mais usuais da indústria, sugere-se a **Tabela 2.2**, usar as faixas de espessuras mais encontradas.

O alívio de tensões é obrigatório após as operações de soldagem desses materiais, e deve ser feito na faixa de 520 a 620 °C com 1 hora para cada 25,4 mm de espessura e, fazer o alívio preferencialmente imediatamente após a soldagem, caso não seja possível, fazer um pós aquecimento com 50 °C acima da temperatura máxima de préaquecimento empregada, com um patamar de 1 a 4 horas e promover resfriamento lento.

**Tabela 2.2 Sugestão de Préaquecimento**

AÇO SAE	TEMPERATURA DE PRÉAQUECIMENTO		
	e < 12,7 (mm)	12,7 < e < 25,4 (mm)	25,4 < e < 50,8 (mm)
4130	150 - 200	200 - 250	250 - 300
4140	200 - 250	250 - 300	300 - 350
4340	300 - 350	300 - 350	300 - 350
4640	200 - 250	250 - 300	250 - 300
5140	200 - 250	250 - 300	250 - 300
8640	150 - 200	200 - 250	250 - 300

## 2.3 Aços inoxidáveis

Trincas por hidrogênio não ocorrem nos aços inoxidáveis austeníticos, sendo o préaquecimento desnecessário, no caso de soldagem dissimilar com os aços ferríticos, deve ser considerado as **Tabelas 2.9 a a 2.9.d**, para os aços inoxidáveis martensíticos o préaquecimento e alívio são obrigatórios, afim de tornar a ZTA menos frágil e sujeita a trincas.

Os aços inoxidáveis podem sofrer vários tipos de Tratamento térmico, os mais importantes após soldagem são descritos abaixo:

### a) Redistribuição de Tensões

Situa-se na faixa de temperatura entre 290 a 425 °C, sendo abaixo da faixa de sensitização, sendo aplicável para peças deformadas em até 30% ou soldadas.

Com este tratamento térmico há uma significativa redistribuição dos picos de tensões e um aumento dos limites de tensão e escoamento, sendo que a precipitação e sensitização intergranular não são problema para os graus de aços inoxidáveis envelhecidos com alto carbono.

### **b) Alívio de Tensões Parcial**

As temperaturas giram entre 425 a 595 °C, é adequado normalmente para minimizar distorções provocados por usinagem ou mesmo entre de operações de soldagem e antes das operações de usinagem, somente devem ser empregados para os graus baixo carbono "L" e os estabilizados 321 e 347.

### **c) Alívio de Tensões Pleno**

Está entre 815 a 870 °C, é ocasionalmente necessário para alívio de aproximadamente 90 % da tensões, mas somente poderão sofrer este tratamento térmico os graus baixo carbono "L", e os estabilizados 321 e 347. Em testes de susceptibilidade a corrosão de acordo com ASTM A262 não foi revelada sensitização, em peças sujeitas ao tratamento térmico nesta faixa de temperatura.

### **d) Solubilização**

O tratamento deve ser no mínimo a 900 °C de 1 a 10 horas são ocasionalmente empregado em conjuntos soldados, quando sua utilização em trabalho for na faixa de 400 a 900 °C. O objetivo da solubilização é a aglomeração dos carbonetos para a prevenção de precipitação intergranular de carbonetos, tal como no alívio pleno, consegue-se bons resultados de susceptibilidade a corrosão intergranular de acordo com o ASTM A262

**TABELA 2. 3 RESUMO DO TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS**

<b>Erro! Indicador não definido.TIPO DE TRATAMENTO TÉRMICO</b>	<b>FINALIDADE DO TRATAMENTO</b>	<b>AÇOS INOXIDÁVEIS</b>	<b>FAIXA DE TEMPERATURA (°C)</b>
Redistribuição de tensões	Homogeneizar o conjunto aumentar limite de escoamento e resistência	todos	290 a 425
Alívio de tensões parcial	Minimizar distorções por usinagem e conjuntos soldados	graus "L" 321 347	425 a 595
Alívio de tensões pleno	Aliviar tensões	graus "L" 321 347	815 a 870
Solubilização	Prevenir corrosão intergranular	todos	acima de 900

## **2.4 Ligas de Níquel**

O préaquecimento na maioria das ligas não é necessário, somente no caso de peças espessas e/ou complexas, pode-se especificar algum préaquecimento, geralmente deve-se consultar o fabricante da liga, pois, existe uma quantidade de ligas muito grande.

## 2.5 Ligas de Titânio

As ligas comercialmente disponíveis, não requerem préaquecimento.

## 2.6 Ligas de Magnésio

Somente em algumas ligas fundidas, é necessário préaquecer as peças com uma temperatura de 250 a 350 °C, com o intuito de evitar trincas no metal base.

## 2.7 Ligas de Cobre

O cobre puro ou ligas com pequenas adições, tem alta condutibilidade térmica, e o préaquecimento é necessário para se obter boa fusão na junta.

Normalmente para espessuras menores que 3 mm, e dependendo do processo de soldagem e seu calor imposto, o préaquecimento não é necessário, com espessuras maiores pode-se chegar à casa dos 700 °C.

Os bronzes, bronzes alumínio, monel e latões, necessitam de aproximadamente 150 °C de préaquecimento para se obter boa fusão na junta.

A necessidade de tratamento térmico em juntas soldadas nas ligas de cobre, é necessário quando exige-se, boas propriedades de ductilidade, o ciclo térmico obedece uma subida constante, patamares na ordem de 1 hora por polegada de espessura de depósito de solda.

Para eletrodos com depósitos de E CuSn-A e E CuSn-C recomenda-se um tratamento com patamares de 480 °C, para se obter alta ductilidade.

A intersecção da coluna com linha da **Tabela 2.7.a** indica qual o metal de adição empregado para soldar pelo processo GTAW, mostrado pelo algarismo da **Tabela 2.7.b**, e o préaquecimento pela letra da **Tabela 2.7.c**.

**Tabela 2.7.a Combinação Metais Base para ligas de Cobre soldadas pelo processo GTAW**

LIGA	COBRE	BRONZE FOSFOROSO	BRONZE ALUMÍNIO	BRONZE SILÍCIO	CUPRO NÍQUEL
COBRE	1A / 3A				
BRONZE FOSFOROSO	1A / 3A				
BRONZE ALUMÍNIO	2A	1A / 2A			

<b>BRONZE SILÍCIO</b>	1A / 3A	7C	2E		
<b>CUPRO NÍQUEL</b>	1A / 3A / 4A	1E	2E	2E	4E
<b>NÍQUEL</b>	4A / 5A				4E / 5E
<b>MONEL</b>	4A / 5A				4E / 5E
<b>INCONEL/ INCOLOY</b>	6A				6A
<b>AÇO BAIXO C</b>	2A / 3A / 6A	1C	2D	2E	2E / 6E
<b>AÇO MÉDIO C</b>	2A / 3A / 6A	1C	2c	2E	2E / 6E
<b>AÇO ALTO C</b>	2A / 3A / 6A	1B	2B	2C	2E / 6E
<b>AÇO BAIXA LIGA</b>	2A / 3A / 6A	1B	2B	2C	2E / 6E
<b>AÇO INOX AUSTENÍTICO</b>	2A / 3A / 6A	1C	2E	2E	2E / 6E
<b>FERRO FUNDIDO CINZENTO</b>	2A / 3A	1C	2C	2D / 7D	2E
<b>FERRO FUNDIDO DUCTIL</b>	2A / 3A	1C	2E	2E / 7E	2E

**TABELA 2.7.b METAL DE ADIÇÃO INDICADO**

<b>No.</b>	<b>VARETA</b>
1	ER Cu Sn-A
2	ER Cu Al-A2
3	ER Cu
4	ER Cu Ni
5	ER Ni Cu-7
6	ER Ni-3
7	ER Cu Si-A

**TABELA 2.7.C PRÉAQUECIMENTO INDICADO**

<b>LETRA</b>	<b>PRÉAQUECIMENTO (°C)</b>
A	500 mínimo
B	250 mínimo
C	200 mínimo
D	150 mínimo
E	80 máximo

## **2.8 Ligas de Alumínio**

Devido a maioria das ligas de alumínio tem alta condutibilidade térmica, por vezes o préaquecimento é necessário para se obter boa fusão na junta.

No caso de ligas com solução sólida o préaquecimento não deve exceder a 400 °C, e ligas endurecidas por precipitação, não podem ir além de 150 °C.

Geralmente o préaquecimento, quando as seções são muito grandes e espessas, e este faz-se necessário, a fim de diminuir os gradientes de temperatura e reduzir as tensões induzidas por estes gradientes.

Para ligas da classe 6XXX com tempera T-4 e T-6, em algumas oportunidades, onde temos que ter uma recuperação da resistência da ZTA, é necessário um tratamento de solubilização e envelhecimento. Em algumas oportunidades somente o

envelhecimento é vantajoso, já que a solubilização poderá provocar distorções e mais tensões residuais.

## **2.9 Juntas Soldadas com Metais Dissimilares**

As **Tabelas 2.9.a e 2.9.b** funcionam da seguinte maneira: a intersecção entre uma linha e uma coluna, as quais são dois metais distintos a serem soldados sendo, fornece um algarismo que corresponde ao consumível a ser empregado, que pode ser obtido na **Tabela 2.9.c**, e uma letra corresponde ao ciclo térmico recomendado para a junta dissimilar, que pode ser obtido na **Tabela 2.9.d**.

O processo de soldagem aplicáveis para as tabelas sugeridas são SMAW, na coluna eletrodo, e GTAW, GMAW para a coluna de arames, para o processo SAW, pode-se empregar o arame indicado e com a adição do fluxo correspondente, o qual deve ser consultado o fabricante.

**TABELA 2.9.a - COMBINAÇÃO DE METAL BASE**

TIPO	MATERIAIS FERROSOS													
	P No (*)	310	316 316L	347 321	304 304L	3 1/2 Ni	12 Cr 405	12 Cr 410	9 Cr 1 Mo	5 Cr 1/2 Mo	2 1/4 Cr	1 1/4 Cr	C Mo	A C
AÇO C	P1	12 A	12 A	12 A	12 A	1 C	1 B	1 F	1 G	1 E	1 E	1 D	1 B	1 A
C Mo	P3	12 B	12 B	12 B	12 B	2 C	2 B	2 F	2 G	2 E	2 E	2 D	2 B	
1 1/4 Cr 1/2 Mo	P4	12 D	12 D	12 D	12 D	3 D	3 D	3 F	3 G	3 E	3 E	3 D		
2 1/2 Cr 1 Mo	P5	12 E	12 E	12 E	12 E	4 E	4 E	4 F	4 G	4 E	4 E			
5 Cr 1/2 Mo	P5	12 E	12 E	12 E	12 E	5 E	5 E	5 F	5 G	5 E				
9 Cr 1 Mo	P5	12 G	12 G	12 G	12 G	6 G	6 G	6 G	6 G					
12 Cr 410	P6	12 F	12 F	12 F	12 F	7 F	7 F	7 F						
12 Cr 405	P7	12 H	12 H	12 H	12 H	7 C	12 H 7 D							
3 1/2 Ni	P9	12 C	12 C	12 C	8 C 13 AC									
304 304L	P8	9 H	9 H	9 H										
347 321	P8	10 H	10 H	10 H										
316 316L	P8	11 H	11 H											
310	P8	16 H												

(\*) O agrupamento de materiais P n° empregados corresponde ao ASME IX.

**TABELA 2.9.b - COMBINAÇÃO DE METAL BASE**

LIGAS DE NI					
TIPO	P No	NIQUEL 200	MONEL 400	INCONEL	INCOLOY
ACO CARBONO	P1	13 H	14 H	13 H	13 H
ACO INOX	P8	13 H	13 H	13 H	13 H
INCOLOY	P45	13 H	13 H	13 H	13 H
MONEL	P42	15 H	14 H		
NIQUEL	P41	15 H			

**TABELA 2.9.c - CONSUMÍVEL DE SOLDAGEM**

CONSUMIVEIS DE SOLDAGEM					
No	MATERIAL	ELETRODO REVESTIDO		ARAME SOLIDO	
		ASME	AWS	ASME	AWS
1	AÇO CARBONO	5.1	E 7018	5.18	ER 70S-2
2	C Mo	5.5	E 7018 A1	5.18	ER 80S-D2
3	1 1/4 Cr 1/2 Mo	5.5	E 8018 B2	5.28	ER 80S-B2
4	2 1/4 Cr 1 Mo	5.5	E 9018 B3	5.28	ER 90S-B3
5	5 Cr 1/2 Mo	5.4	E 502	5.9	ER 502
6	9 Cr 1 Mo	5.4	E 505	5.9	ER 505
7	12 Cr	5.4	E 410	5.9	E 410
8	3 1/2 Ni	5.5	E 8018 C2	5.28	ER 80S-Ni 3
9	304 304L	5.4	E 308 E 308L	5.9	ER 308 ER 308L
10	347	5.4	E 347	5.9	ER 347
11	316 316 L	5.4	E 316 E 316L	5.9	ER 316 ER 316L
12	309	5.4	E 309 E 309 Mo E 309 CB E 309 L	5.9	ER 309 ER 309 Mo ER 309 CB ER 309 L
	INCONEL		5.11		E NiCrFe 3
13	INCONEL	5.11	E NiCrFe 3	5.11	ER NiCr 3
14	MONEL	5.11	E NiCu 7	5.14	ER NiCu 7
15	NIQUEL	5.11	E Ni 1	5.14	ER Ni 1
16	310	5.4	E 310	5.9	ER 310

**TABELA 2.9.d - TRATAMENTO TÉRMICO E PREAQUECIMENTO**

LETRA	PREAQUECIMENTO MINIMO (°C)	PATAMAR MÍNIMO (°C) X TEMPO (H) (*)	TRATAMENTO TÉRMICO
A	10 °C MINIMO	T ≤ 19,04 mm	DESNECESSARIO
	T > 25,4mm 100 °C MINIMO	T > 19,04 mm - 595 °C X H/25,4mm	OPCIONAL
B	10 °C MINIMO	T ≤ 12,7mm	DESNECESSARIO
	T > 12,7mm 100 °C MINIMO	T > 12,7mm - 595 °C X H/25,4mm	OPCIONAL
C	100 °C MINIMO	595 °C X H/25,4 mm	OBRIGATÓRIO
D	150 °C MINIMO	705 °C X H/25,4 mm 2 H MINIMO	OBRIGATÓRIO
E	180 °C MINIMO	705 °C X H/25,4mm 2 H MINIMO	OBRIGATÓRIO
F	200 °C MINIMO	725 °C X H/25,4mm 2 H MINIMO	OBRIGATÓRIO
G	180 °C MINIMO POS-AQUEC 300 °C X 1 H/25,4mm	705 °C X H/25,4mm 2 H MINIMO	OBRIGATÓRIO
H	10 °C MINIMO		DESNECESSARIO

(\*) Para saber a faixa máxima de Temperatura acrescentar 50 °C a faixa mínima, Para tempo máximo de permanência adotar 6 horas.

## 2.10 Ferro Fundido

### a) Cinzento

Para um alívio de tensões parcial e redução de dureza, de no máximo 30%, um patamar de 480 °C e resfriamento em ar calmo produz bons resultados. Um a temperatura de 590 °C por uma hora e resfriamento em ar calmo reduz substancialmente as tensões e a dureza. Para máxima redução de dureza na ZTA, promover aquecimento à 900 °C e resfriar em forno.

### b) Ductil

Por causa da boa ductilidade, que é a característica deste metal, os fundidos que sofrerem soldagem, devem ter a região soldada o restabelecimento das suas propriedades, sendo que para atingir bons resultados, deve-se promover o alívio de tensões imediatamente após as operações de soldagem, não deixar esfriar, e seguir de resfriamento lento.

Se necessita-se de moderada ductilidade, um aquecimento a 480 °C e resfriamento em ar calmo, já é o suficiente para diminuir a dureza da ZTA e as tensões internas

Caso necessite de alta ductilidade, deve-se recozer conforme o ciclo abaixo

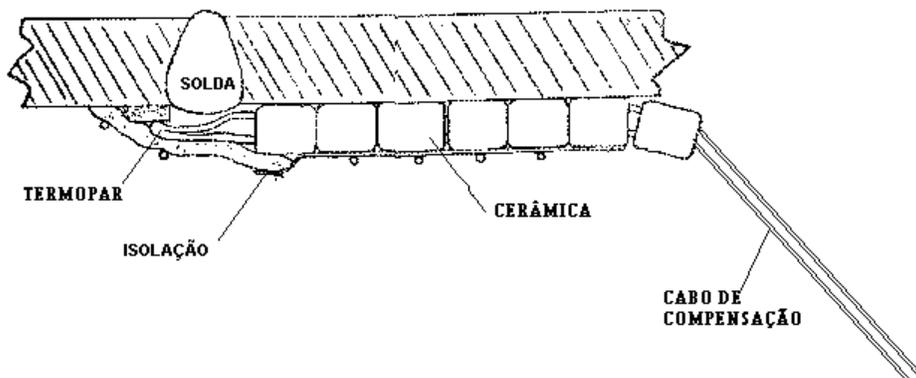
Aquecer até 900 °C a uma taxa de 55 °C/hora máximo, para um patamar de 1 hora por polegada de espessura, resfriar a uma taxa de 55 °C/hora máximo, até 260 °C e em seguida resfriar em ar calmo.

Este recozimento a alta temperatura, dissolve os carbonetos e transforma a bainita e martensita em austenita. O resfriamento lento favorece a formação de ferrita, perlita e a precipitação de carbono na forma de grafita.

### 3. EQUIPAMENTOS

#### 3.1 Termopares

Os termopares devem ser fixados junto ao cordão de solda através de porcas soldadas com um corte em um dos segmentos para a fixação perfeita do termoelemento, ou por meio de soldagem por descarga capacitiva, conforme mostrado na **Figura 3.1**.



**Figura 3.1** Fixação de Termopares

Tipos mais usados para os tratamentos com solda:

Termopar tipo J (Ferro Constantã) até 800 °C de serviço, melhor trabalhar até 650 °C

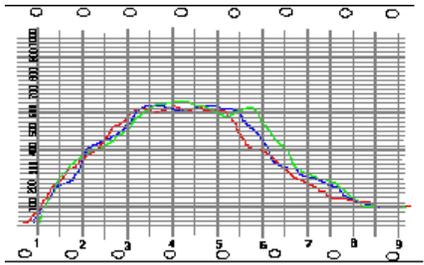
Termopar tipo K (Ni Cr Ni) até 1200 °C de serviço.

Os termopares geram corrente contínua e portanto tem polaridade que deve ser observada na hora das ligações, entre os cabos de compensação e o registrador, geralmente o negativo é identificado com um sinal e é o metal magnético.

#### 3.2 Registradores Gráficos de Temperatura

Os registradores gráficos devem ser periodicamente( geralmente 1 ano) aferidos e calibrados com padrões rastreáveis, e deve existir um controle, tanto para os registradores como para os termopares.

Registradores gráficos podem ter desde 1 ponto de medição de temperatura até 36 ou mais pontos, podem ser analógicos ou digitais, e fornecem gráficos semelhantes a **Figura 3.2**



**Figura 3.2 Gráfico Típico de Tratamento Térmico**

### **3.3 Cabos de Compensação**

De constituição igual ao termopar porém muito mais flexível, conduz a corrente elétrica produzida pelo termopar até o registrador de temperatura.

Identificação do cabo segundo ANSI:

Tipo J azul

Tipo K amarelo

## **4. Métodos de Tratamento Térmico**

O Tratamento Térmico em fornos constitui-se de uma solução tecnicamente perfeita, os quais são feitos com bastante facilidade, no entanto frequentemente as dimensões das peças impedem sua entrada no forno ou em alguns casos excede o comprimento deste, em outros casos impõem-se o tratamento de juntas soldadas em elementos grandes e extensos, tais como tubulações ou conjuntos petroquímicos. Nestes casos, e dependendo das exigências das normas pode-se efetuar um tratamento térmico localizado em vários períodos ou em partes.

A seguir enumeramos os diversos métodos de tratamento térmico:

- Fornos fechados elétricos ou a combustão;
- Elementos aquecedores elétricos por resistência;
- Equipamentos de aquecimento indutivo;
- Gases quentes;
- Queimadores a gás;
- Dispositivos vibratórios;
- Martelamento.

## 4.1 Fornos Fechados

É a forma mais recomendável e econômica de se executar um tratamento térmico.

São estruturas de aço revestidas com placas de materiais refratários que suportam altas temperaturas, quanto mais alta a temperatura a ser submetida, mais caro será o custo do revestimento térmico, para se confinar o equipamento utiliza-se diversos modelos tais como: Campânula, portas laterais ou mesmo contínuo, as dimensões são as mais variadas, geralmente de seções arredondadas para facilitar e manter o aquecimento constante e uniforme.

Como fonte de calor para o aquecimento são usados materiais combustíveis como óleo ou gás, também utilizam-se resistências elétricas. Os elementos aquecedores são distribuídos de maneira a provocar um aquecimento por igual em todas as partes do equipamento

A atmosfera é geralmente redutora e o equipamento sofre uma pequena oxidação.

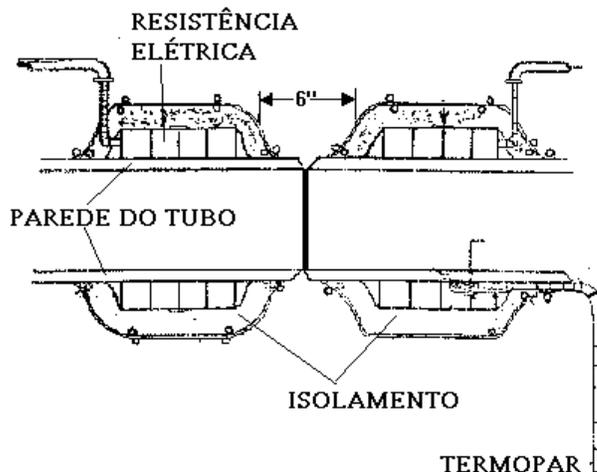
## 4.2 Aquecimento Resistivo

Este método ainda é largamente empregado devido ao seu baixo custo quando comparado a outros métodos de tratamento térmico localizado e sua boa confiabilidade.

Consiste de elementos resistivos protegidos por material cerâmico que é convenientemente ajustado em torno do local a ser tratado, sendo este conjunto protegido por mantas cerâmicas, material de isolamento térmica capaz de manter a região tratada nas temperaturas de até 1200 °C.

As resistências são supridas de energia através de fontes de corrente contínua de baixa tensão, geralmente máquinas de solda, conjuntos transformador/retificador.

Um exemplo de uma montagem de um aquecimento localizado em tubulação é mostrado na **Figura 4.2**.



**Figura 4.2** Tratamento Térmico de uma Tubulação

O controle do fornecimento de energia é feito através da própria máquina ou por meio de painéis computadorizados, ou por meios de relés onde as taxas de temperatura são controladas através de pirômetros.

### 4.3 Aquecimento Indutivo

A comparação com o transformador talvez seja o melhor meio para ilustrar o aquecimento indutivo, é geralmente feito localizadamente.

O transformador consiste de três conjuntos básicos:

- Enrolamento primário;
- Enrolamento secundário;
- Núcleo de chapas de ferro silício.

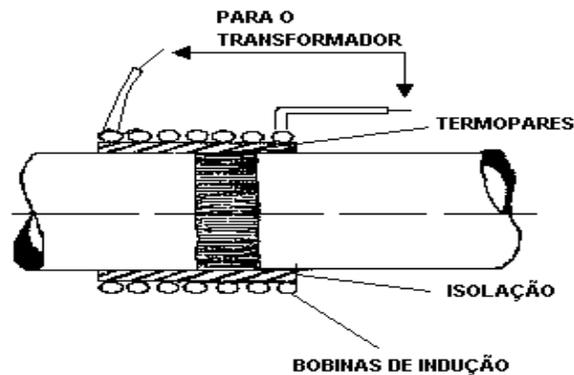
Aplicando-se uma tensão alternada ao primário do transformador, será induzido um fluxo magnético no núcleo, o qual por sua vez induzirá uma tensão no secundário.

Transferindo-se este princípio para o aquecimento indutivo numa junta tubular, será um cabo de cobre flexível condutor de energia, enrolado ao redor do tubo em várias espiras. Quando a energia flui no enrolamento o núcleo que não é um bom condutor de energia será aquecido, pela uma tensão alternada de frequência apropriada.

Entre o cabo indutor e o corpo da peça é feito um isolamento térmico, mostrado na **Figura 4.3**.

Este cabo por vezes é refrigerado convenientemente através de um fluxo de água que flui no seu interior.

As fontes de energia são geralmente geradores ou retificadores de frequência apropriada para esta finalidade, o controle de temperatura se equivale ao do resistivo.



**Figura 4.3 Aquecimento Indutivo**

### 4.4 Gases Quentes

Este método utiliza-se de queimadores a óleo ou gás combustível. O processo é bem simples mas o seu controle é extremamente difícil e exige-se de técnicas bem desenvolvidas.

O princípio baseia-se no aquecimento através da queima de um combustível, sendo o produto da queima injetado no interior da peça, a qual está convenientemente isolada termicamente.

Este método tem grande aplicação para equipamentos como vasos e principalmente esferas, uma precaução tem que ser tomada quanto a pontos frios como bocais e tomadas, que por vezes não atingem o ciclo desejado e devem ser aliviadas as tensões por outro método de tratamento.

#### **4.5 Queimadores a Gas**

Geralmente empregados para tempera localidade, o processo bem simples, o controle do processo ser pouco eficiente, adaptando-se bem para temperaturas abaixo de 450 °C.

Emprega-se para tal queimadores a chama combustível que são convenientemente dispostos e aproximados para dar a taxa de temperatura adequada, não há isolamento quando a região está sendo aquecida, em certos casos após atingir o patamar, retira-se a fonte de calore isola-se a região para um resfriamento mais lento.

#### **4.6 Dispositivos Vibratórios**

Este método há muito tempo é investigado, é principalmente usado para dar estabilidade dimensional a peças soldadas e reduzir a susceptibilidade a corrosão sob tensão reduzindo parte das tensões residuais internas da peça.

O dispositivo consiste de um oscilador acoplado firmemente à peça onde as variáveis são:

- A frequência;
- O período de oscilação;
- A Carga aplicada;

Explica-se o método como ondas de choque produzidas por um vibrador. Fazem com que a estrutura do corpo metálico se acomodem em um nível de energia menor, traduzindo-se assim numa menor tensão residual interna no componente.

Uma das grandes utilizações deste método é garantir estabilidade dimensional em estruturas soldadas para operações futuras de usinagem

#### **4.7 Martelamento**

Também chamado de PEENING, é muito empregado em soldas de manutenção, onde o controle de deformações é um fator determinante, por ser um processo de alívio de tensões mecânico tem função limitada, e deve ser empregado com muito critério, por pessoal treinado.

Geralmente o martelamento é empregado imediatamente após ser efetuado o cordão de solda, devendo ser feito por martelo de bola em único sentido, com a aplicação da carga de impacto constante, justamente para aliviar por igual as tensões.

#### ***4.8 Técnicas de Reparo sem TTAT***

Uma técnica permitida para pequenos reparos em materiais ferrosos, sem fazer alívio de tensões após soldagem, é permitido pelo ASME VIII chamado de passes de revenimento ou (Temper bead).

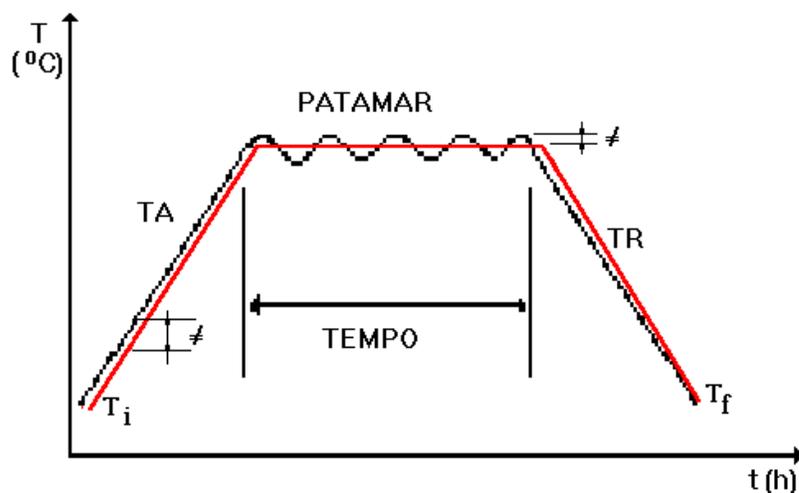
## 5.Procedimento de Cálculo de Alívio de tensões

Para determinarmos a necessidade do emprego do tratamento térmico de alívio de tensões, utiliza-se como base o código ASME seção VIII divisão 1 edição de 1992, pois é o mais largamente empregado, e é uma norma de fácil obtenção, para obter os dados principais das Normas AWS, ASME ou British Standard, é fornecida a **Tabela 6.4**

Para proceder o cálculo do ciclo térmico é necessário conhecer as dimensões do equipamento e adequar às condições de fabricação e dimensões do forno e o tipo de material do equipamento, além disso devemos levar em consideração se o nosso equipamento pode ser transportado em uma única peça até o local da montagem, se temos capacidade de manuseio na fábrica, etc., afim de que possamos optar pelos métodos de tratamento térmico de alívio de tensões.

Escolhido o método ou os métodos, pode-se haver mais de um, em um único equipamento.

Passa-se em seguida para a determinação da espessura nominal, que é o parâmetro para o cálculo do parâmetro **tempo** e temperatura de **patamar**. Para determinar a Taxa de Aquecimento (**TA**) e Taxa de Resfriamento (**TR**) temos que saber qual a maior espessura envolvida, para vasos sob pressão seria entre casco ou tampo, Outros parâmetros contemplados no procedimento são: Temperatura inicial de controle (**T<sub>i</sub>**), Temperatura final de Controle (**T<sub>f</sub>**), Diferenças de Temperatura entre termopares no Aquecimento ou Resfriamento (**≠a,r**), Diferenças de Temperatura entre Termopares no Patamar (**≠p**), conforme a **Figura 5.0**.

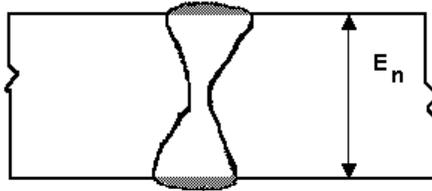


**Figura 5.0 Principais Parâmetros de um Tratamento de Alívio de Tensões**

### 5.1 Determinação da Espessura Nominal (En)

A **espessura nominal ( En )** determinada será empregada para a determinação da temperatura e tempo de patamar.

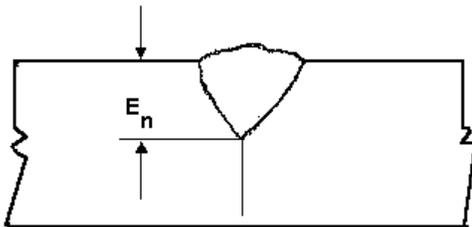
a) A **espessura nominal** ( $E_n$ ) a ser empregada, deverá ser a maior espessura da solda em qualquer parte do equipamento, desde que não tenha sido previamente tratada, por exemplo soldas de flanges onde geralmente é necessário uma usinagem prévia e consequente estabilidade dimensional.



PENETRAÇÃO TOTAL

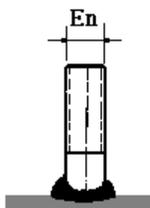
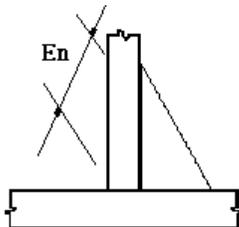
b) Para soldas de topo com penetração total de mesma espessura, a  $E_n$  é a profundidade total da solda exetuando-se os reforços, tanto de face com de raiz.

c) Para soldas em chanfro sem penetração total, será a profundidade do chanfro.

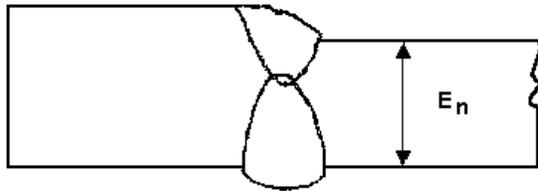


PENETRAÇÃO PARCIAL

d) Para soldas em ângulo será a dimensão da garganta, se houver junta chanfrada e em ângulo, deve-se considerar a de maior dimensão. Para soldagem por pinos será o diâmetro do pino.

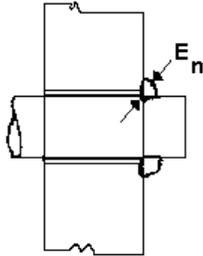


e) Quando houver uniões soldadas de espessuras diferentes, a  $E_n$  será a seguinte:



≠ ESPESSURA

- A menor espessura de duas chapas adjacentes a uma junta soldada, inclusive em juntas casco com tampo.
- A maior espessura das chapas do casco ou fundo unidos por casco intermediário
- A espessura do casco, quando unidos a tubo espelho, tampo plano, tampas, flanges ou construções similares.

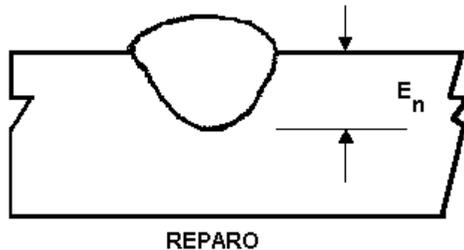


TUBO - ESPELHO

f) Considerar sempre a de maior espessura as soldas ao longo de pescoço de conexões, fundo, casco, anel de reforço ou soldas em angulo quando ocorrer:

- Juntas em partes sujeitas a pressão com não sujeitas a pressão, será as de sujeitas a pressão.
- Em conexões será a espessura da conexão.
- Em tubo espelho será a solda do tubo com o espelho.

g) Para reparos a **En** é a profundidade do reparo.



### 5.2 Determinação da Taxa de Aquecimento (TA)

- Acima de Temperatura inicial de Controle **Ti** (°C) a velocidade de aquecimento não deve ser superior a **TA** (°C/h) divididos pela maior espessura do casco ou tampo, mas em nenhum caso a taxa de aquecimento deverá ultrapassar a **TA** (°C/h).
- As temperaturas registradas durante o aquecimento devem ser controladas efetivamente a partir de **Ti** (°C) em nenhum momento não deve-se ter variação entre os termopares maior do que  $\neq a,r$  (°C) no intervalo de **d** metros.
- A **Tabela 6.1** fornece as taxas (**TA**) e (**TR**) para as espessuras mais comuns.

### 5.3 Determinação da Temperatura e Tempo de Patamar

- Quando partes sujeitas a pressão unidas por solda com P número diferentes, o tratamento de alívio de tensões deverá ser específico e de acordo com o material de maior temperatura de patamar.
- A **En** será sempre aquela onde for sujeita a pressão.

- c) O equipamento deve permanecer pelo período de tempo especificado na **Tabela 6.2**.
- d) Durante o período de **patamar** a diferença superior e inferior entre os termopares não deverá ir além de  $\neq p$  (°C).

#### **5.4 Determinação da Taxa de Resfriamento**

- a) O resfriamento deve ser feito até a temperatura final de controle **T<sub>f</sub>** (°C) com controle de temperatura e em forno fechado e/ou com isolamento, abaixo desta pode-se resfriar sem a proteção de isolamento térmica desde que sem correnteza de ar, com uma diferença máxima de termopares de  $\neq a, r$  (°C).
- b) O resfriamento deve seguir a uma razão de **TR** (°C) dividido pela espessura do casco ou tempo, a maior deles em nenhum dos casos deve superar a taxa de **TR** (°C/h), a **TABELA 6.1** fornece os valores mais comuns.

#### **5.5 Determinação da Redução de Temperatura de Patamar**

- a) Quando a temperatura especificada para o tratamento de alívio de tensões for maior que a capacidade do forno ou método adotado, permite-se que se reduza a temperatura de patamar, mas com o conseqüente aumento do tempo de patamar, a **TABELA 6.3** fornece este cálculo.

#### **5.6 Tratamento Térmico em duas ou mais etapas**

- a) Quando não houver possibilidade de executar o tratamento térmico em uma única etapa, por exemplo quando o comprimento do equipamento exceder o comprimento do forno, o tratamento pode ser executado em várias etapas, utilizando-se a técnica do emparedamento, que consiste em manter parte do equipamento dentro do forno, isolando o meio exterior com tijolos refratários u mantas cerâmicas, desde que exista uma sobreposição de 1,6 metros na região anteriormente tratada.

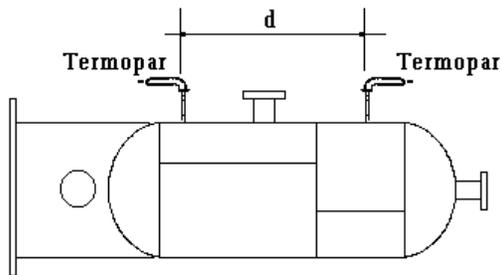
#### **5.7 Recomendações e Cuidados**

- a) Após o carregamento das peças no forno ou montagem dos dispositivos de aquecimento localizado, deve-se atentar para que seja proporcionada a livre movimentação das peças durante o processo de tratamento, pois se ficarem fixas poderá provocar deformações durante o tratamento.

O apoio das peças deve ser eficiente, pois o aquecimento reduz drasticamente o limite de escoamento em consequencia a rigidez da peça.

- b) A colocação de termoelementos deve seguir os seguintes itens:

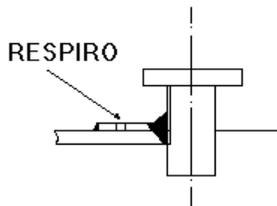
- A distância entre termopares em qualquer direção não pode ultrapassar a  $d$  metros



- A fixação não deve ser executada sobre o cordão de solda

c) Se a forma de aquecimento for a chama, esta nunca deve atingir diretamente o corpo do equipamento, afim de evitar que as superfícies não sofram oxidação excessiva.

d) Deve-se ter cuidados especiais com relação á expansão do ar aquecido em soldas confinadas, por exemplo em reforços de conexões, selas, etc., pois se não estiverem providas de respiro, poderão surgir trincas em tais soldas ou se tivermos um eixo oco, temos que abrir um furo, procedendo se necessário a ressoldagem do furo após tratamento, pois a não observância deste critério pode-se provocar uma explosão, ou terem distorções localizadas.

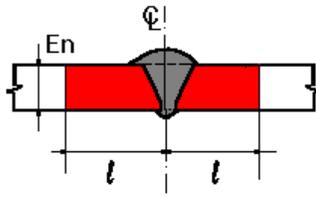


### **5.8 Tratamentos Localizados**

a) Quando houver a escolha de tratamento térmico localizado a peça deve estar devidamente apoiada em local sem correntes de ar, abrigada da chuva ou outras intempéries.

b) A área aquecida deverá abranger também os dispositivos de montagem quando estes houverem.

c) A largura mínima da faixa de aquecimento deverá ser de 6 vezes a espessura nominal **En**, e nunca inferior a 50 mm, tomando-se como referência a linha de centro do cordão de solda.



$$L = 6 * En$$

### 5.9 Registros e Controle de temperatura

a) Para que possamos ter rastreabilidade e confiabilidade se o tratamento térmico for feito de acordo com as especificações do código devemos preparar a documentação para a fabricação, sugerimos os seguintes documentos:

- Folha de Processo (contém os dados básicos de Tratamento);
- Registro gráfico do ciclo térmico;
- Certificado de Tratamento;

b) Esta documentação é necessária pois os códigos fazem certas restrições quanto a soldagem e ensaios após o Tratamento térmico, qualquer descuido ao liberar o equipamento para tratamento pode comprometer toda a peça, com por exemplo: não executar um reparo em soldas, não ter soldados todas as peças no equipamento, etc.

c) Recentemente os controles de tratamento térmico tornaram-se informatizados, sendo que os cálculos e controles dos parâmetros do ciclo térmico são feitos através de computadores acoplados a transformadores de corrente, que suprem a peça de calor.

## 6. Tabelas de Cálculo

As Tabelas 6.1 6.2 e 6.3 de consulta rápida a seguir resolvem a maioria dos ciclos térmicos de Alívio de tensões empregados na indústria, os valores foram arredondados para facilitar a operação, e estão conforme o ASME VIII div 1. ed 92

**TABELA 6.1 - TAXAS DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO**

Espessura En (mm)	Taxa de Aquecimento (TA) ( °C/h) Máximo	Taxa de Resfriamento (TR) ( °C/h) Máximo
$e \leq 25,4$	220	275
$25,4 > e \geq 31,8$	170	220
$31,8 > e \geq 38,1$	145	185
$38,1 > e \geq 44,5$	120	155
$44,5 > e \geq 50,8$	110	135
$50,8 > e \geq 63,5$	85	110
$63,5 > e \geq 76,2$	70	90
$76,2 > e \geq 88,9$	60	75
$88,9 > e \geq 101,6$	55	65
$e > 101,6$	55	55

**TABELA 6.2 TEMPERATURAS E TEMPOS DE PATAMAR**

P n°	G n°	Temperatura de Patamar ( °C ) Mínimo (*)	Tempo de Permanência horas Mínimo	
			En ≤ 50,8 mm	En > 50,8 mm
1	1,2,3	595	1 h/ 25,4 mm 15 minutos mínimo	2 h + 15 minutos para cada 25,4 mm adicionais
3	1,2,3	595	e ≤ 101,6 mm = 1 hora por 25,4 mm  e > 101,6 mm = 5 horas + 15 minutos para cada 25,4 mm adicionais  15 minutos mínimo	
4	1,2	595		
5	1,2	680		
	3,4	705		
9 A	1	595		
9 B	1	595		
10 A	1	595		
10 B	1	595		
10 C	1	540		
10 F	1	595		

(\*) Para temperatura máxima acrescentar 50 °C a temperatura mínima

**TABELA 6.3 REDUÇÃO DE TEMPERATURAS DE PATAMAR**

Redução de Temperatura Normal de Patamar (°C)	Tempo Mínimo de Permanência na Temperatura Reduzida para cada 25,4 mm de espessura
28	2
56	4
83	10 (*)
111	20 (*)

(\*) APLICÁVEL SOMENTE A MATERIAIS P n° 1 com G n° 1,2

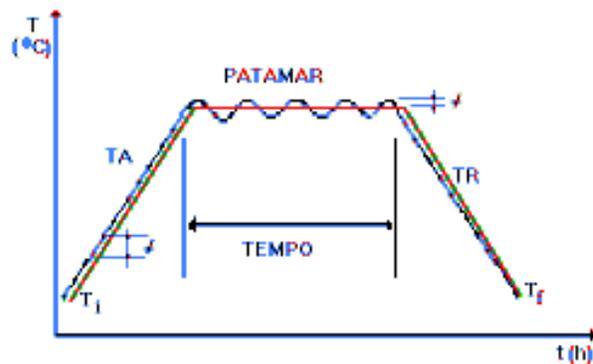
## 6.4 TABELAS DE PARAMETROS DE TTAT CONFORME NORMAS INTERNACIONAIS

PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES	UNIDADE	ASME	AWS	BS
TEMPERATURA INICIAL DE CONTROLE ( $T_i$ )	°C MAX	427	315	400
TAXA DE AQUECIMENTO ( $T_A$ )	°C/HORA MÁX	222	220	220
TAXA DE RESFRIAMENTO ( $T_R$ )	°C/HORA MÁX	278	260	275
TEMPERATURA DE <b>PATAMAR</b> (*)	°C	595	590 a 650	580 a 620
<b>TEMPO</b> DE PERMANÊNCIA	HORA	(**)	(**)	(***)
TEMPERATURA FINAL DE CONTROLE ( $T_f$ )	°C MIN	427	315	400
DIFERENÇA DE TERMOPARES NO AQUEC. ( $\neq a, r$ )	°C MAX	139	140	150
DIFERENÇA ENTRE TERMOPARES NO PATAMAR ( $\neq p$ )	°C MIN	83	83	40
DISTÂNCIA ENTRE TERMOPARES ( $d$ )	A CADA (m) MAX	4,6	4,6	4,5

(\*) **APLICÁVEL PARA AÇOS AO CARBONO**

(\*\*) 1 HORA para cada 25,4 mm de Espessura Nominal **En**.

(\*\*\*) 1 hora para cada 25,0 mm de Espessura Nominal **En**.

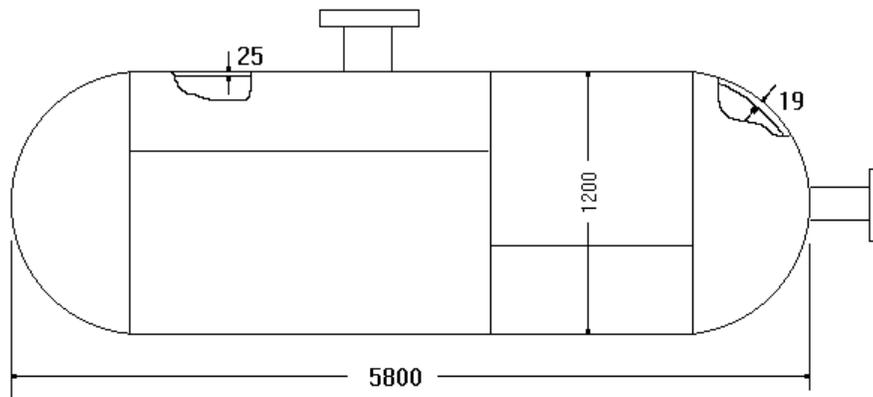


## 7. Exemplo de Cálculo de Tratamento Térmico de Alívio de Tensões e Análise de Gráfico

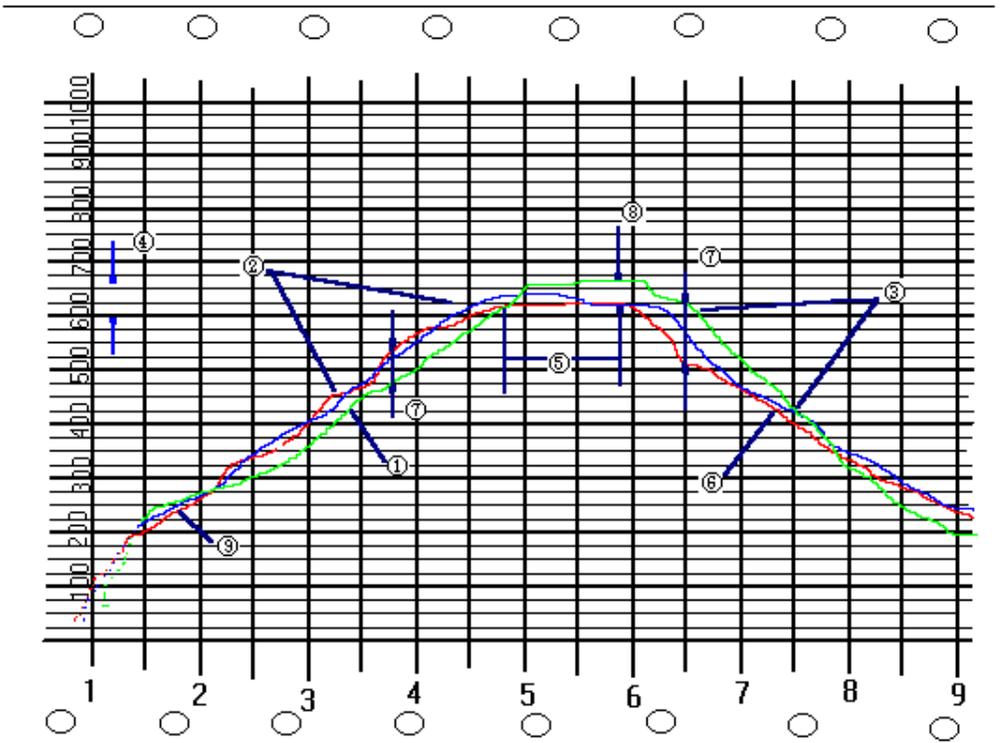
Dados o Equipamento da **Figura 7.0**, O **Gráfico 7.0** do Tratamento Térmico executado, e demais condições abaixo verificar se o tratamento térmico está adequado ao procedimento 5.0.

Dados:

Equipamento : Vaso de Pressão  
Código : ASME VIII div 1 - ed 92  
Material : P no. 3  
Local do TT : Forno Elétrico



**Figura 7.0** Croqui do Equipamento



**Gráfico 7.0 Gráfico de Tratamento Térmico**

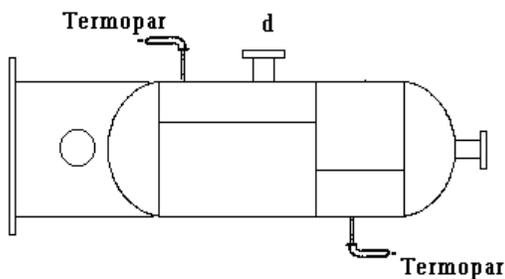
A Tabela 7.0 resolve o problema apresentado, a coluna da direita indica os parâmetros a serem analisados, e o valor calculado, a coluna da direita mostra qual o local do gráfico que o item foi analisado, e seu respectivo artigo do procedimento do item 5.0.

A análise do ciclo térmico deve ser feita em intervalos de 30 minutos ou em 60 minutos, dependerá das condições do gráfico e das exigências do procedimento.

A seguir toma-se o intervalo desejado e verifica-se a variação de temperatura para cada termopar e os compara com a FOLHA DE PROCESSO, se o intervalo for horário as taxas sairão direto, já em intervalos de 30 minutos, a variação de temperatura deverá ser multiplicada por 2, atentar sempre as observações de máximo e mínimo.

**TABELA 7.0 SOLUÇÃO DO PROBLEMA**

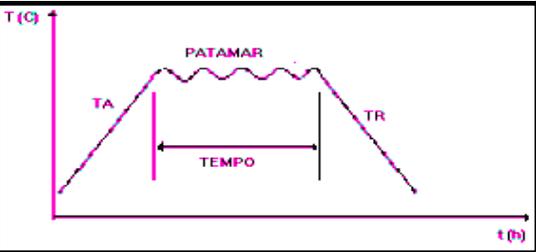
PARÂMETRO ANALISADO	VALOR CALCULADO	VALOR ENCONTRADO NO GRÁFICO	OCORRÊNCIA INDICADA NO GRÁFICO 7.0	ITEM DO PROCEDIMENTO
Espessura Nominal ( <b>En</b> )	25 mm			Figura 7.0 e Item 5.1.a
Temperatura Inicial de Controle ( <b>Ti</b> )	427 °C	200 °C	* aprov	Item 5.2.a e Tabela 6.4
Taxa de Aquecimento ( <b>TA</b> )	220 °C/hora	150 °C/hora	* aprov	Item 5.2.a Tabela 6.1 centro
Taxa de Resfriamento ( <b>TR</b> )	275 °C/hora	200°C/hora	* aprov	Item 5.4.a e Tabela 6.1 direita
Temperatura de <b>Patamar</b>	595 a 645°C	625 A 660°C	* reprov	Item 5.3.a/b e Tabela 6.2 esquerda
<b>Tempo</b> de Patamar	1 hora	1,5 horas	⊕ aprov	Item 5.3.c e Tabela 6.2 direita
Temperatura Final de Controle ( <b>Tf</b> )	427 °C	250°C	⊕ aprov	Item 5.4.a
Diferença entre Termopares no Aquecimento e Resfriamento ( <b>≠a,r</b> )	139 °C	aquec 75°C resfr 125 °C	◇ aprov	Item 5.2.b e 5.4.a
Diferença entre Termopares no patamar ( <b>≠p</b> )	83 °C	35 °C	⊖ aprov	Item 5.3.d
Número de Termopares	2	3	◇ aprov.	item 5.2.b/e
Localização dos termopares	Figura 7.0.a			Item 5.7.b



**Figura 7.0.a Localização de termopares**

## 8. Formulários

Em anexo é fornecido o formulário: FOLHA DE PROCESSO, que fornece ao usuário as informações mínimas necessárias para a execução do tratamento térmico de alívio de tensões.

		<b>PROCEDIMENTO DE TRATAMENTO TÉRMICO</b>		TT no.
				FOLHA
PEÇA/SUB CONJUNTO	CONJUNTO	CLIENTE	QUANT, PEÇA	
<b>DADOS DO EQUIPAMENTO</b>				
1. Identificação	2. Dimensões	3. Espessuras		
<b>4. DADOS DE CÁLCULOS</b>				
4.1 TEMPERATURA INICIAL DE CONTROLE :		°C MAX		
4.2 TAXA DE AQUECIMENTO :		°C/HORA MÁX		
4.3 TAXA DE RESFRIAMENTO :		°C/HORA MÁX		
4.4 TEMPERATURA DE PATAMAR :		°C		
4.5 TEMPO DE PATAMAR:		HORAS MIN		
4.6 TEMPERATURA FINAL DE CONTROLE :		°C MIN		
4.7 DIFERENÇA DE TERMOPARES NO AQUEC.:		°C MAX		
4.8 DIFERENÇA ENTRE TERMOPARES PATAM.:		°C MIN		
4.9 NÚMERO DE TERMOPARES :		MINIMO		
<b>5. CROQUI DO EQUIPAMENTO E LOCALIZAÇÃO DOS TERMOPARES</b>				
				
<b>6. CICLO TÉRMICO</b>				
EMITIDO POR:		APROVADO POR		REVISÃO

## 9. Bibliografia

Técnica de Deposição em dupla camada para reparos e modificações sem tratamento térmico pós soldagem em aço 1 Cr - 0,5 Mo  
José Claudio Guimarães Teixeira  
Anais do IIW 92'pg. 589

Sindo Kou  
Welding Metalurgy

Heat Treatment of Welded Structures  
F. M. Burdekin  
The Welding Institute

Curso Tratamento Térmico de Alívio de Tensões em Juntas Soldadas  
Luiz Gimenes Jr. - 1994 - São Paulo/SP  
ABS-FATEC-SP

A guide for determing postweld heat treatment requeriments for asme code section VIII pressure vassel  
D. D. Carpenter

Recosimento de soldas em tubulações, recipientes e reatores nucleares  
H. H. Muller

Local Heat Treatment by induction  
H. H. Müller

The significance of residual welding stresses- some experimental results and practical experience in shipyard  
N. G. Leide  
Paper 15 IIW 1989

Vibration and Vibratory stress relief, Historical developement, theory and pratical aplication  
Dr. G. Gniss

Metals Handbook, 8 th edition Vol. 2  
American Welding Society

Welding Chart Sandvik.

The Procedure Handbook of Arc Welding  
The Lincoln Electric Co.

Manual de Soldagem  
Alcan Alumínio do Brasil S/A

Welding steels without hydrogen cracking  
F. R. Coe

The Welding Institute

Brithis Standart BS 5500 ed 1988

ASME VIII DIV I ed 1992

ASME Code For Pressure Piping Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping  
ANSI/ASME B31.3-1980

Recommmeded Practices for Chromium-Molybdenum Steel Piping and Tubing  
AWS D10.8-78

Welding Code Steel  
AWS D1.1-88

Local Heat Treatment of Welds in Piping and Tubing  
AWS D10.10-75

Metals Handbook Vol 6  
ASM 1989

Soldagem Processos e Metalurgia  
E. Wainer  
Edgard Blucher - 1992

Aços e Ligas Especiais  
Eletrometal -1988  
Costa e Silva, A L & Mei, P.R.