

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

# PROJETO, CONSTRUÇÃO E AFERIÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PARA TESTE DE TRINCA DE REAQUECIMENTO

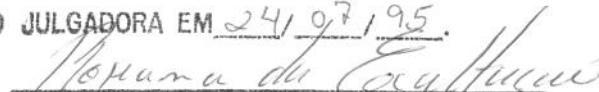
Autor: Fábio Martins

Orientadora: Roseana da Exaltação Trevisan

07/95

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR FÁBIO MARTINS

E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 24/07/95.



ORIENTADOR

Profª. ROSEANA DA EXALTAÇÃO TREVISAN

Matric. 04564-1

FEM - UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

# **PROJETO, CONSTRUÇÃO E AFERIÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PARA TESTE DE TRINCA DE REAQUECIMENTO**

**Autor: Fábio Martins**

**Orientadora: Roseana da Exaltação Trevisan**

Curso: Engenharia Mecânica

Unidade: Faculdade de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Trabalho apresentado à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 24 de Julho de 1995  
S.P. - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M366p      Martins, Fábio  
Projeto, construção e aferição de um equipamento para  
teste de trinca de reaquecimento. / Fábio Martins.--  
Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientadora: Roseana da Exaltação Trevisan  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Soldagem. 2.\* Trincas de reaquecimento. 3.\* Teste  
de implante modificado. I. Trevisan, Roseana da  
Exaltação. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

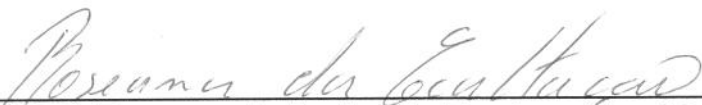
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

# PROJETO, CONSTRUÇÃO E AFERIÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA TESTE DE TRINCA DE REAQUECIMENTO

Autor: **Fábio Martins**

Orientadora: **Roseana da Exaltação Trevisan**



Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Roseana da Exaltação Trevisan, Presidente



Prof. Dr. Augusto José de Almeida Buschinelli



Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

Campinas, 24 de Julho de 1995.



**Dedicatória:**

Dedico este trabalho às minhas filhas Vanessa e Maria Júlia.

## Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser concluído sem a colaboração e o apoio de diversas pessoas, às quais presto agora a minha homenagem:

À Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan, pela orientação, paciência e carinho que sempre me dispensou neste período.

À minha esposa, Valéria Borges Rainha Martins, pela compreensão e apoio, principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Jorge e Clélia, pelo apoio total e incondicional em todas as horas.

Ao meu amigo Valtair Antônio Ferraresi, pela amizade, companheirismo e sobretudo pela paciência.

Ao meu amigo Paulo Villani Marques pelo apoio técnico nas montagens eletrônicas e pelos trabalhos de soldagem.

À Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo financiamento do equipamento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Fabricação, pelo auxílio e colaboração com este trabalho, em especial ao Claudomiro Alves, o Mirão, que teve um grande envolvimento neste trabalho, e também aos demais funcionários, Marília, Rute, Ari, Vanderlei, Niederaurer, Alberto e Roseli.

Aos colegas do DEF, em especial ao Hipólito, Maximino, Carlos Camello, Andréa, Herta, Janos, Sandro, Gino e Marcelo Gomes.

À Rita, do laboratório de Metalografia, pela presteza e boa vontade sempre demonstradas.

Ao amigo Dalberto Dias da Costa, pela doação das pastilhas de cerâmica.

À USIMINAS pela doação do aço SAR 80 T para os ensaios.

À DEUS, fonte de toda luz e sabedoria.

*"Não se mede o valor de um homem pelas  
suas roupas ou pelos bens que possui.  
O verdadeiro valor do homem é o seu caráter,  
suas idéias e a nobreza de seus ideais."*

*Charles Chaplin*

# SUMÁRIO

	Página
Capítulo 1: INTRODUÇÃO.....	1
Capítulo 2: TRINCAS DE REAQUECIMENTO:	
UMA BREVE INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1- INTRODUÇÃO.....	2
2.2- ALÍVIO DE TENSÕES EM JUNTAS SOLDADAS.....	3
2.3- MECANISMO DE FORMAÇÃO DA TRINCA DE REAQUECIMENTO.....	5
2.4- INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	10
2.5- ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À TRINCA DE REAQUECIMENTO.....	12
2.5.1- TESTES COM SOLDAGEM REAL.....	14
A- TESTE DE GLOSSOP.....	15
B- TESTE DE VINCKIER.....	15
C- TESTE LEHIGH.....	17
D- TESTE TEKKE.....	17
2.5.2- TESTES FEITOS COM SIMULAÇÃO DA ZAC.....	19
A- TESTE TIPO ANEL.....	19
B- ENSAIO DE RELAXAÇÃO.....	20
C- TESTE DE RELAXAÇÃO DE TENSÃO.....	21
D- TESTE DE DOBRAMENTO EM TRÊS PONTOS.....	22
E- TESTE DE TRINCA DE ALÍVIO DE TENSÃO.....	23
F- TESTE DE RUPTURA À CARGA CONSTANTE.....	24
G- TESTE DE TENSÃO À TEMPERATURA CONSTANTE.....	25
2.5.3- MÉTODOS QUE INDEPENDEM DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DA ZAC.....	25
A- ENSAIO CHARPY.....	25
B- MONITORAMENTO POR EMISSÃO ACÚSTICA.....	26
2.6- O TESTE DE IMPLANTE MODIFICADO.....	28

CAPÍTULO 3: PROJETO E CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA O TESTE DE IMPLANTE MODIFICADO.....	36
3.1- O SISTEMA DE AQUECIMENTO.....	37
3.1.1- PROJETO.....	37
3.1.2- CONSTRUÇÃO DO FORNO.....	46
3.2- O SISTEMA DE TRAÇÃO.....	51
3.2.1- O CORPO DE PROVA E A PLACA DE TESTE.....	51
3.2.2- CARGAS ATUANTES NO SISTEMA.....	53
3.2.3- PROJETO E DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE TRAÇÃO.....	54
A- BRAÇOS DE ALAVANCA.....	55
B- BARRA INFERIOR.....	58
3.2.4- CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA DE TRAÇÃO.....	61
3.3- SISTEMA DE MONITORAMENTO.....	64
CAPÍTULO 4: PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	67
4.1- MATERIAIS.....	67
4.2- CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E PLACAS DE TESTE.....	68
4.3- PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS.....	70
4.4- PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM.....	71
4.5- PROCEDIMENTOS E ESTRATÉGIA DE TESTE.....	73
4.5.1- TESTES DE TRINCA DE REAQUECIMENTO.....	74
4.5.2- TESTES DE TRINCA A FRIO.....	77
4.6- AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA SOB A AÇÃO DOS ESFORÇOS.....	78
4.7- ENSAIOS DE FLEXIBILIDADE DO SISTEMA DE AQUECIMENTO.....	79
4.8- AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	79
4.9- METALOGRAFIA E ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA.....	80
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
5.1- TESTES DE TRINCA A FRIO.....	83
5.2- TESTES DE TRINCA DE REAQUECIMENTO.....	85
5.3- TESTES DE REPETIBILIDADE.....	94

5.4- TESTES DO SISTEMA DE AQUECIMENTO.....	97
5.4.1- TESTE DE VERSATILIDADE DO SISTEMA.....	97
5.4.2- TESTE DE AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA DO SISTEMA.....	98
5.5- AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO	
DA ESTRUTURA SOB A AÇÃO DOS ESFORÇOS.....	99
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES.....	102
CAPÍTULO 7: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	110

## LISTA DE FIGURAS

	Página
2.1- Ciclo térmico de um metal soldado e posteriormente reaquecido.....	6
2.2- Diagrama de Baker e Nutting mostrando a sequência de formação de carbeto em função do tempo de aquecimento para um aço 2 ¼ Cr-1Mo.....	7
2.3- Ciclo de formação e propagação da fratura frágil.....	9
2.4- Diagrama MRT (Mitsubishi Restraint Test).....	12
2.5- Testes de Glossop: (a) Teste de Glossop com tubo soldado, (b) Teste de Glossop com dois blocos soldados.....	15
2.6- Teste de Vinckier: (a) placas de aço ferrítico, (b) conjunto aço ferrítico + aço inox.....	16
2.7- Corpo de prova para o Teste Lehigh.....	17
2.8- Blocos Chanfrados para o Teste Tekken.....	18
2.9- Corpo de prova para o Teste Tekken.....	18
2.10- Teste tipo anel.....	20
2.11- Corpo de prova para Ensaio de Relaxação de Tensões.....	21
2.12- Esquema do Teste de Relaxação de Tensão utilizando a máquina Gleeble.....	22
2.13- Esquema do Teste de Dobramento em Três Pontos.....	23
2.14- Corpo de prova para o teste de alívio de tensão de Hipsley.....	23
2.15- Aparato de monitoramento por emissão acústica.....	27
2.16- Esquema de fixação do corpo de prova à placa de teste e detalhamento das dimensões da placa e do cordão.....	30
2.17- Equipamento projetado por Tamaki e Suzuki.....	30
2.18- Sistema de tracionamento por alavanca.....	31
2.19- Equipamento para teste de implante modificado tal como projetado por Ferraresi et al.....	32
2.20- esquema de um corpo de prova com detalhamento da região entalhada.....	33

2.21- Gráfico de TensãoxTemperaturaxTempo, típico do teste de implante modificado.....	34
3.1- Áreas de troca de calor do forno.....	39
3.2- Esquema da armação metálica do forno.....	48
3.3- Esquema final do forno.....	50
3.4- Corpo de prova para o teste de implante modificado.....	52
3.5- Placa de teste para o teste de implante modificado.....	53
3.6- Esquema do sistema de tração.....	55
3.7- Alavanca do sistema de tração.....	56
3.8- Barra inferior do sistema de tração.....	58
3.9- Esquema de utilização da guia e do perfil circular.....	60
3.10 Peça de transmissão de tração conectada por um lado à célula de carga e por outro lado ao corpo de prova.....	63
3.11- Peça de transmissão de tração conectada por um lado à célula de carga e por outro à barra inferior.....	63
3.12- Peça de transmissão de tração que conecta a célula de carga às duas peças anteriores (duas unidades).....	64
3.13- Esquema do sistema de monitoramento do Teste de Implante Modificado.....	66
4.1- Foto de um corpo de prova.....	69
4.2- Foto de uma placa de teste.....	70
4.3- Equipamento de soldagem utilizado no teste.....	72
4.4- Cordão de solda obtido.....	72
4.5- Ajuste de tensão de tração por meio da porca.....	74
4.6- Equipamento de teste para trinca de reaquecimento, tal como projetado neste trabalho.....	76
4.7- Forno de tratamento térmico projetado e construído neste trabalho, com seu sistema de controle.....	77
4.8- Equipamento de teste sem a utilização do forno.....	78
4.9- Reforço estrutural junto à barra inferior.....	79
4.10- Sistema de monitoramento utilizado no Teste de Implante Modificado.....	81



4.11- Vista geral dos equipamentos utilizados para os ensaios.....	81 82
5.1- Valores de tensão em função do tempo obtidos nos testes de Trinca de Hidrogênio.....	84
5.2- Macrografia da seção transversal de uma solda mostrando a extensão da ZAC.....	87
5.3- Curvas obtidas com o Teste de Implante Modificado aplicado ao aço SAR 80 T.....	88
5.4- Macrografia de uma seção transversal a um cordão de solda, com um corpo de prova rompido.....	89
5.5- Curvas de tensão versus tempo para uma tensão localizada dentro do intervalo entre 132 e 165 MPa.....	90
5.6- Macrografia de uma seção transversal a um cordão de solda, com a localização de uma trinca.....	91
5.7- Curva do aço ABNT 1045 submetido ao Teste de Implante Modificado.....	92
5.8- Curvas de tensão versus tempo para o SAR 80 T à 165 MPa.....	95
5.9- Curvas de tensão versus tempo para o SAR 80 T à 132 MPa.....	95
5.10- Curvas de tensão versus tempo para o ABNT 1045 à 321,74 MPa.....	96
5.11- Curva de temperatura versus tempo.....	97
5.12- Curva de temperatura versus tempo para condição de máxima velocidade de aquecimento.....	98
5.13- Curva de tensão versus deformação da barra inferior com reforço estrutural.....	100

## LISTA DE TABELAS

	Página
2.1- Equações para a determinação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento.....	11
3.1- Propriedades físicas típicas da placa Duraboard 1200.....	38
3.2- Algumas características do fio Kanthal-A1.....	38
4.1- Composição química (em % em peso) e propriedades mecânicas do aço ABNT 1045.....	68
4.2- Composição química (em % em peso) e propriedades mecânicas do aço SAR 80 T.....	68
4.3- Parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho.....	71
5.1- Resultados dos Testes de Implante Modificado realizados neste trabalho.....	86
5.2- Valores de deformação da barra inferior do sistema de tração com a utilização do reforço estrutural.....	99

## RESUMO

MARTINS, F., *Projeto, Construção e Aferição de um Equipamento para Teste de Trinca de Reaquecimento*, 111 p., Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

Trincas de Reaquecimento ocorrem, em geral, na zona afetada pelo calor de juntas soldadas de aços estruturais de baixa liga e alta resistência durante um tratamento térmico de alívio de tensões pós-soldagem. O Teste de Implante Modificado mostrou-se como uma forma eficaz para a avaliação da suscetibilidade dos metais a este problema. Este trabalho tem como objetivo principal a construção de um equipamento para teste de implante modificado para a avaliação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento. A aferição do equipamento é feita através do ensaio de dois aços nacionais, dos quais um suscetível ao problema e outro não.

### *Palavras Chave*

- Soldagem, Trincas de Reaquecimento, Teste de Implante Modificado.

## ABSTRACT

MARTINS, F., *Project, construction and checking of a equipment to Reheat Cracking Test.*, 111 p., Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

Reheat Crackings occur, in general, in the heat affected zone of welded joints of high strength low alloy structural steels during a post welding stress relief heat treatment. The modified implant test showed an effective form to the metal's susceptibility evaluation to this problem. This work had as main objective the construction of a modified implant test equipment to the reheat cracking's susceptibility evaluation. The checking of the equipment was done through of test of two national steels, one of which is susceptible to the problem and other is not.

## **CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO**

O homem, desde a aurora dos tempos, tem se empenhado na busca do progresso, tentando desta maneira melhorar suas condições de vida e suas chances de sobrevivência como espécie. Este impulso do ser humano, neste século, tem se refletido em um expressivo progresso tecnológico, maior que em todas as outras áreas de conhecimento. Assistiu-se ao nascimento de novas tecnologias bem como ao aperfeiçoamento de algumas já existentes. A soldagem, apesar de existir à centenas de anos, neste século alcançou um imenso progresso, tornando-se o principal método de união entre metais e um dos principais processos de fabricação existentes, sendo, desta maneira, indispensável para a vida do homem moderno.

Porém, se a soldagem progrediu, novos problemas também surgiram, fruto das solicitações cada vez maiores impostas às estruturas. É prática rotineira, hoje em dia, a construção de grandes estruturas de aço em qualquer região do planeta, inclusive em alto mar, e estas estruturas metálicas necessitam de uniões sólidas e resistentes para adquirir confiabilidade.

As trincas em juntas soldadas são um dos problemas mais sérios enfrentados pela soldagem, pois podem causar falhas súbitas através do rompimento das seções, acarretando grandes prejuízos materiais e até, em determinadas situações, perda de vidas. A trinca de reaquecimento é um dos tipos de trinca menos conhecidos e compreendidos até hoje, e atingem determinados tipos de metais, entre os quais os aços de alta resistência e baixa liga, também conhecidos como ARBL, que são utilizados em estruturas metálicas para se obter uma boa resistência mecânica sem um aumento excessivo do peso da estrutura.

Para se determinar se um metal é ou não suscetível à trinca de reaquecimento existe um grande número de ensaios, entre os quais se destaca o teste de implante modificado. Este trabalho se propõe a dar uma contribuição ao estudo da trinca de reaquecimento através do projeto e construção de um equipamento de teste de implante modificado para a avaliação da suscetibilidade dos metais a este problema.

## **CAPÍTULO 2-TRINCAS DE REAQUECIMENTO: UMA BREVE INTRODUÇÃO TEÓRICA**

### **2.1- INTRODUÇÃO**

Trinca de Reaquecimento (Reheat Cracking) é o nome que se dá ao fenômeno do surgimento de falhas intergranulares nas regiões de granulação grosseira da zona afetada pelo calor (ZAC) ou, mais raramente, do metal de solda em aços estruturais ligados e microligados, em superligas à base de Níquel e em aços inoxidáveis austeníticos [6, 11, 21, 26] durante a exposição da região soldada à temperaturas elevadas e tensões de tração. As temperaturas ditas elevadas podem ser decorrentes de um tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) aplicado após a soldagem ou simplesmente da faixa de temperaturas de trabalho do equipamento. A faixa de temperatura onde ocorre este fenômeno não é objeto de consenso entre os pesquisadores. Embora a maioria deles [4, 6, 13, 24,] aceite como mais provável a faixa entre 500 e 700 °C, alguns consideram faixas mais estreitas, tais como 482-677°C [3] e 427-602 °C [17]. Este fenômeno é também conhecido por outros nomes, tais como Trinca de Alívio de Tensão (Stress Relief Cracking), Fragilidade à Fluência (Creep Embrittlement) e Fissuração por Envelhecimento (Strain Age Cracking) [3, 4, 11, 13, 24, 25].

As primeiras menções a este tipo de trinca ocorreram na metade da década de 50 [11], e desde então muitos esforços foram feitos para se determinar as suas causas e mecanismos.

Neste capítulo serão vistos os métodos de alívio de tensões em juntas soldadas, o mecanismo de formação da trinca de reaquecimento, a influência da composição química do metal, os testes para a determinação da suscetibilidade do metal à trinca de reaquecimento e, em especial, o teste de implante modificado.

## 2.2- ALÍVIO DE TENSÕES EM JUNTAS SOLDADAS

Durante um processo de soldagem o metal base é submetido a grandes variações de temperatura, que afetam diferentemente as várias regiões da peça, visto que estas regiões expandem-se e contraem-se à sua própria taxa, de acordo com o insumo de calor recebido, além do que, a fusão e posterior solidificação da poça de fusão também implica em expansões e contrações. Estas diferentes expansões e contrações provocam o aparecimento de tensões internas que, aliadas ou não às solicitações a que a peça pode ser submetida durante a sua vida útil, pode fazer com que ocorram falhas em serviço.

É inegável que um tratamento de alívio de tensões representa um custo adicional no processo de fabricação, porém do ponto de vista da segurança este custo torna-se justificável, se confrontado com os eventuais custos de reparos, tempo perdido e às vezes até de indenizações por danos causados a pessoas. De fato, na literatura é citado um caso onde houve perda de vidas num desastre causado por trincas de reaquecimento em juntas soldadas [12].

Os métodos de alívio de tensões residuais mais conhecidos são o Martelamento e o Tratamento Térmico e, em menor escala, o Sobrecarregamento, a Explosão, a Vibração e o Esmerilhamento [1, 19].

O Martelamento consiste da deformação ou estiramento da solda por alguma forma de choque mecânico. Ao ser martelado, o metal se deforma plasticamente e absorve as tensões residuais. Este processo pode ser aplicado à solda quente ou já resfriada e tem a seu favor o fato de representar um custo adicional muito baixo, porém é de baixa repetibilidade e precisão, além de não poder ser aplicado a qualquer tipo de solda, pois algumas se situam em locais problemáticos ao martelamento. Além disso, o martelamento pode induzir o aparecimento de novas tensões e deformações que podem agravar a condição da estrutura.

No alívio de tensões por Sobrecarregamento, também conhecido como alívio de tensões por Encruamento [32], a aplicação de uma força de tração numa junta soldada resulta na redução das tensões residuais, pois o carregamento se soma às tensões internas que atuem na mesma direção e

sentido, superando o limite de escoamento e deformando-o plasticamente, acomodando as tensões internas a um nível mais baixo. O sobrecarregamento é aplicado normalmente a vasos de pressão de geometria simples.

O alívio de tensões por Explosão é um processo análogo ao sobrecarregamento, porém mais severo, agindo num período de tempo menor e atingindo níveis de solicitação mais altos. Consiste da detonação de explosivos de maneira que a peça ou estrutura soldada seja submetida a um esforço que, somado ou não às tensões internas, deforme plasticamente o metal, acomodando as tensões. Esta técnica, segundo a literatura [19], resulta em boa estabilidade dimensional, diminuição da suscetibilidade à trinca de corrosão de tensão (Stress Corrosion Cracking) e aumento da resistência à fadiga e à fratura frágil, porém é perigoso.

O alívio de tensões por Vibração consiste da indução de vibração em uma estrutura soldada até que esta alcance uma ou mais frequências de ressonância, fazendo com que toda a estrutura seja submetida a uma solicitação elástica. Quando isso ocorre, regiões da estrutura que já apresentavam um quadro de tensões internas podem sofrer deformações plásticas pela superposição dos esforços residuais e de vibração. Supõe-se que o nível de relaxação alcançado seja pequeno, menor que 40%, porém em casos onde seja mais importante um estado de tensões balanceadas do que uma redução mais efetiva das tensões residuais, o relaxamento de tensões por vibração é indicado, sendo mais barato do que um tratamento térmico com o mesmo objetivo. A faixa de frequências utilizada por esta técnica está entre 80 e 200 Hz, e o equipamento básico inclui um vibrador acionado por motor e um equipamento de variação da rotação do motor, de modo a se variar a frequência para que se encontre a frequência de ressonância da estrutura.

Outra técnica utilizada para o alívio de tensões em soldas é o Esmerilhamento, que se dá pela alteração dimensional e pela remoção de inclusões que, dependendo da forma e localização, podem agir como concentradores de tensões. É um método caracterizado pelo baixo custo e pela baixa repetibilidade e precisão.



A técnica de alívio de tensões por tratamento térmico é hoje em dia a mais utilizada. Consiste no aquecimento da peça ou região soldada a uma determinada temperatura de modo que o limite de escoamento do material caia a níveis inferiores aos das tensões internas, permitindo que estas se acomodem por meio de deformações plásticas locais, também chamadas de movimentos de discordâncias. A grande vantagem deste método é a sua repetibilidade e controlabilidade, bastando-se, para se obter o resultado desejado, manter-se uma dada temperatura por um tempo determinado, o que, considerando-se o atual nível de desenvolvimento dos equipamentos eletrônicos para medição e controle de temperatura, é relativamente fácil.

É importante citar que as temperaturas de tratamento térmico, assim como outros procedimentos tais como tempo de aquecimento, tempo de resfriamento, etc., são baseados nas normas existentes, tais como as normas ISO, ASME, JIS, etc.

Também é importante citar que não existe um processo de alívio de tensão que elimine totalmente as tensões internas de um corpo, mas sim processos que minimizam estas tensões, sendo que alguns são mais eficientes que outros.

### 2.3- MECANISMO DE FORMAÇÃO DA TRINCA DE REAQUECIMENTO

De uma maneira geral, pode-se dizer que a trinca de reaquecimento ocorre quando as tensões atuantes na junta durante o tratamento térmico excedem a ductilidade local do material [11]. A inabilidade do metal na absorção das tensões é explicada por uma teoria defendida pela maioria dos pesquisadores deste fenômeno [3,6,9,11,13]. Segundo eles, a ocorrência da trinca de reaquecimento é devida a dois mecanismos independentes: Endurecimento Secundário e Segregação nos contornos de grão.

O mecanismo do Endurecimento Secundário ocorre em três etapas distintas conforme pode-se ver na figura 2.1. Na primeira etapa (fase A) ocorre a dissolução dos carbonetos ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Mo}_2\text{C}$ , etc), que ficam dispersos na matriz metálica em solução supersaturada. Na segunda etapa (fase B), com o rápido

resfriamento, característico do ciclo de soldagem, a precipitação dos carbonetos praticamente não ocorre, ficando então os elementos formadores (C, Cr, Mo, V, etc.) presos na matriz metálica, enquanto que os produtos de transformação Martensita e/ou Bainita são formados.

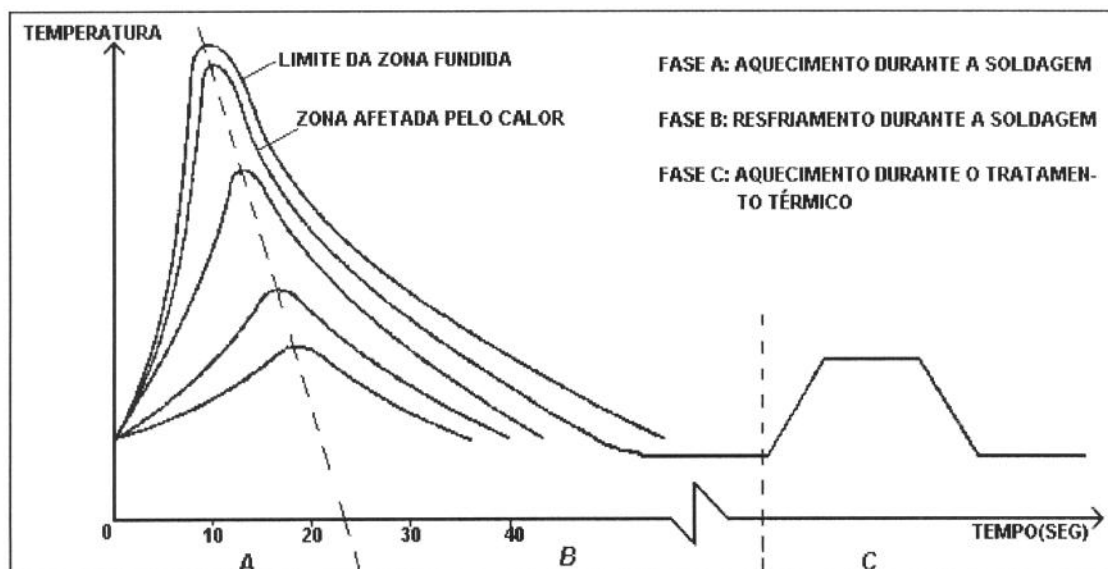


Figura 2.1- Ciclo térmico de um metal soldado e posteriormente submetido à um tratamento térmico.

Na terceira etapa (fase C), quando o metal é submetido ao TTAT, os átomos formadores de carbetos vão se libertando da matriz metálica e se recombinando com o Carbono, numa reação dependente não só da temperatura mas também do tempo, conforme mostra a figura 2.2.

Ao se recombinarem, eles se precipitam de maneira aleatória no interior dos grãos e também nos contornos de grãos, sendo que nestes, por ter uma área relativa menor que o interior dos grãos, as vezes surgem regiões desguarnecidas de carbetos e, conseqüentemente, menos aptas a suportar esforços. Ao se precipitarem no interior dos grãos austeníticos, na forma de plaquetas microscópicas da ordem de alguns Ângstrons, os carbetos aumentam a dureza do interior dos grãos, sendo este fenômeno conhecido como Endurecimento Secundário. Ora, a Física nos diz que um corpo sob a ação de uma força pode apresentar apenas dois comportamentos: deformação ou aceleração. Um grão mais duro tem menor capacidade de se deformar,

tendendo então a deslizar. De fato, o escorregamento intergranular (sliding) é apontado como um dos causadores da trinca de reaquecimento. Aliado a isto, o crescimento dos grãos da ZAC faz com que a área dos contornos de grão diminua de modo que a tensão se concentra numa área relativamente pequena [3]. Deste modo, um grão com pouca capacidade de se deformar tende a se movimentar, ocasionando um deslizamento intergranular que pode dar origem ao trincamento.

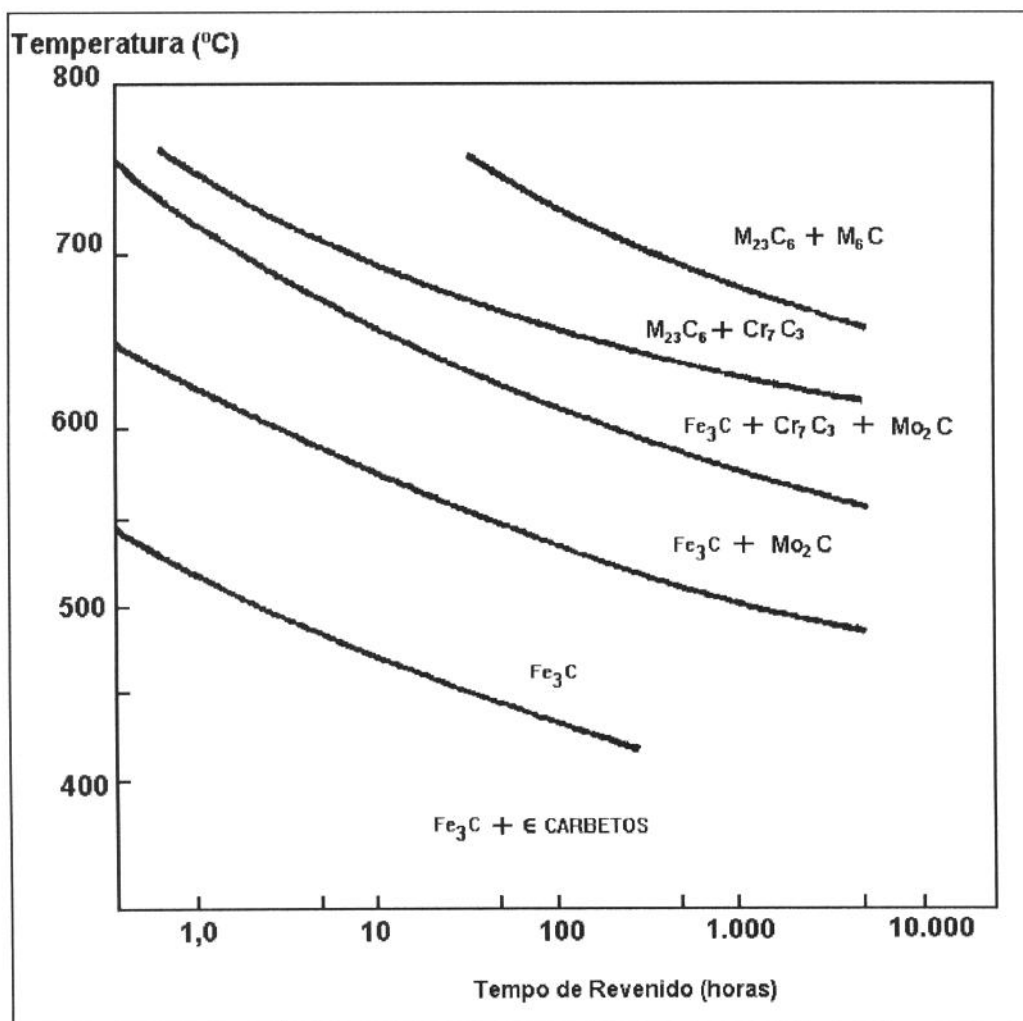


Figura 2.2: Diagrama de Baker e Nutting de formação de carbeto em função do tempo de aquecimento e da temperatura para um aço 2 1/4Cr-1Mo [8].

Simultaneamente ao endurecimento secundário, outro processo termicamente ativado tem lugar: a segregação nos contornos de grão, que vem a ser a expulsão do interior dos grãos para os contornos de elementos

residuais, ou impurezas, tais como P, S, As, Sb, Sn, etc., que tem a propriedade de provocar descoesão e enfraquecer estruturalmente o contorno do grão, diminuindo a sua resistência mecânica, de modo que quando o metal é submetido a tensão surgem microvazios que, ao se juntarem dão origem ao trincamento [3,11,17, 27]. Num estudo recente [27], verificou-se inclusive que a tensão aumenta a cinética da segregação, agravando o quadro de enfraquecimento do contorno de grão. Desta forma, no fenômeno da trinca de reaquecimento, pode-se ter de um lado o enrijecimento do grão, diminuindo a sua capacidade de absorver esforços por deformação plástica, e por outro o enfraquecimento dos contornos dos grãos, onde, devido à movimentação dos grãos, ocorre uma microcavitação e um coalescimento dos vazios, dando origem a trincas intergranulares.

Uma análise mais profunda por parte de alguns pesquisadores [3, 4, 11, 16, 17, 24] mostrou que a Trinca por Reaquecimento pode se dar em dois regimes diferentes: fratura por coalescimento de microvazios intergranulares e fratura frágil intergranular. O primeiro modo de fratura é caracterizado pela cavitação, crescimento e coalizão dos vazios nos contornos de grão, resultando numa fratura com facetas intergranulares rugosas. Para que ocorra é necessário que dois fatores estejam presentes simultaneamente [24]: uma dispersão incoerente de pequenas partículas deve se precipitar nos contornos de grão de austenita primária, atuando como nucleadores de vazios. Além disso, deve se desenvolver uma zona de deformação adjacente ao contorno de grão, para propiciar o crescimento e a coalizão destes vazios. Existe alguma controvérsia sobre a natureza das partículas que atuam como nucleadoras de cavidades, sendo que o MnS (Sulfeto de Manganês) é apontado como o principal nucleador, porém acredita-se que alguns carbeto possam desempenhar este papel.

O modo de fratura frágil intergranular é caracterizado pela descoesão intergranular causada pela segregação de elementos fragilizadores, dos quais o Enxofre e o Fósforo são apontados como os principais responsáveis [16], e resultando numa fratura com facetas intergranulares lisas. O Enxofre e o Fósforo segregam para os contornos de grão durante a soldagem,

aumentando a sua concentração durante o TTAT. A precipitação do Enxofre é induzida pelo campo de tensões hidrostáticas existente à frente da ponta da trinca, que age como um concentrador de tensões. Deste modo, a propagação da trinca se dá passo a passo, seguindo o ciclo mostrado na figura 2.3.

Este ciclo continua indefinidamente até que um equilíbrio seja alcançado, seja pelo trincamento total da seção, seja pela acomodação das tensões a um nível onde não seja mais suficiente para promover a segregação ou para a propagação da trinca.

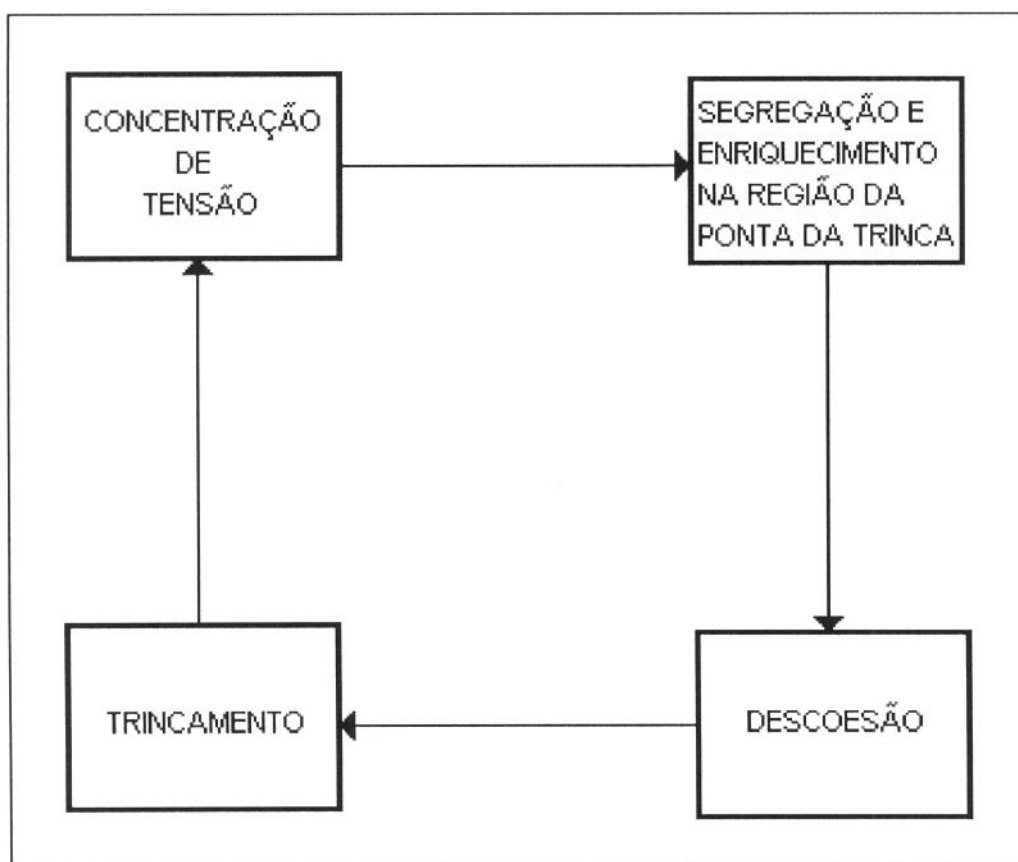


Figura 2.3- Ciclo de formação e propagação da fratura frágil

O fator que determina o tipo de trincamento, se do tipo fratura frágil intergranular ou do tipo microcavitações coalescidas, não está bem claro, alguns pesquisadores [16, 24] acreditam ser a temperatura, sendo que a baixas temperaturas a trinca se daria pelo modo frágil enquanto que o modo de fratura por microcavitações coalescidas se daria a temperaturas mais altas. Obviamente o conceito de temperatura alta ou baixa está relacionado com a

faixa de temperatura onde ocorre a trinca de reaquecimento. Outros pesquisadores [3, 11], porém, acreditam que a tensão desempenhe o papel decisivo, sendo que Dhooge e Vinckier, em uma revisão bastante completa [11] citam testes feitos a temperaturas constantes nos quais se verificou a transição do modo frágil para o dúctil apenas se alterando a tensão. Balaguer et al. [3] observaram que à valores altos de tensão a trinca de reaquecimento se dá pelo modo frágil, enquanto que a baixos níveis de tensão a trinca se dá pelo modo de microcavitações coalescidas.

Portanto, de uma maneira resumida, pode-se dizer que para que ocorra a trinca de reaquecimento é preciso que estejam presentes três fatores simultaneamente, que são, por ordem de importância:

- ⇒ COMPOSIÇÃO QUÍMICA, que propicie a formação de carbeto e a segregação de elementos residuais.
- ⇒ TEMPERATURA, que permita a formação e precipitação de carbeto e auxilie na segregação para os contornos de grão.
- ⇒ EXISTÊNCIA DE TENSÕES NA JUNTA SOLDADA, internas ou externas, que favoreçam a migração de elementos residuais para os contornos de grãos e ocasionem os deslizamentos intergranulares.

## 2.4- INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Compreendendo-se a importância da composição química do metal na ocorrência ou não da Trinca de Reaquecimento, diversas fórmulas baseadas neste parâmetro foram desenvolvidas. A tabela 2.1 lista algumas destas equações.

Como ocorre com outros parâmetros baseados na composição química utilizados para a prevenção de defeitos em soldas, como por exemplo o Carbono Equivalente, o resultado não fornece uma garantia da ocorrência ou não da trinca de reaquecimento, mas nos fornece um balizamento da probabilidade de ocorrência do defeito, pois apesar da trinca de reaquecimento ser um problema basicamente metalúrgico [6], outros fatores tem também a sua parcela de influência, tais como insumo de calor, processo

de soldagem e outras características tecnológicas. Contudo os parâmetros baseados na composição química constituem um instrumento útil e de fácil utilização, não devendo ser desprezados, mas sim entendidos em sua perspectiva de ser uma ferramenta auxiliar, porém não decisiva, na escolha dos materiais para um projeto mecânico.

Tabela 2.1- Equações para a determinação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento [11,34].

PARÂMETRO	EXPRESSÃO	OBSERVAÇÃO
$\Delta G$	$Cr+3,3Mo+8,1V-2$	aços suscetíveis se $\Delta G > 0$ válido para aços com teores de $C \leq 0,18\%$ e $Cr < 1,5\%$
$P_{sr}$	$Cr+Cu+2Mo+10V+7Nb+5Ti-2$	aços suscetíveis se $P_{sr} > 0$ válido para aços com teores de $Mo < 2\%$ , $Cr < 1,5\%$ , $Cu < 1\%$ e $V, Ti, Nb < 0,15\%$
$\Delta G_1$	$Cr+3,3Mo+8,1V+10C-2$	aços suscetíveis se $\Delta G_1 > 2$
CERL	$0,2Cu+0,44S+P+1,8As+1,9Sn+2,75Sb$	suscetibilidade aumenta com o valor de CERL válido para aços SA 533 Cr.B
CERL+Cr	$Cr+0,2Cu+0,44S+P+1,8S+1,95$	suscetibilidade aumenta com o valor de CERL+Cr válido para aços SA 503 C12 e SA 533 Cr.B
X	$10P+5Sb+4Sn+As+Cu$	suscetibilidade aumenta com os valores de X
T	$20V+7C+4Mo+Cr+Cu+1,5\log X-0,5Mn$	$X=Al$ , se $Al \leq 2M$ $X=2M$ , se $Al > 2M$ aços suscetíveis se $T \geq 0,9$ válido para aços SA 508 C12 e SA 533 Cr B
R	$P+2,43As+3,57Sn+8,16Sb$	suscetibilidade cresce com valores de R válido para aços 0,5CrMoV
FATOR X	$\frac{10P+5Sb+4Sn+As}{100}$ [ppm]	aços suscetíveis se fator $X < 25$ , para aços CrMo, ou $< 15$ para aços Mn+Si
FATOR X + Cu	$\frac{10P+5Sb+4Sn+As+Cu}{100}$ [ppm]	idem
MCF	$Si+2Cu+2P+10As+15Sn+20Sb$	suscetibilidade proporcional ao valor de MCF válido para aços CrMo
FATOR J	$(Mn+Si)x(P+Sn)10^4$ % em peso	aços suscetíveis se fator $J < 250$ válido para aços CrMo

Como pode-se ver nas fórmulas listadas na tabela 2.1, alguns elementos são mais deletérios que outros. É o caso do Vanádio, Fósforo e



Enxofre, que tem um peso maior na fórmula e, conseqüentemente, na determinação da suscetibilidade à trinca.

Um método mais sofisticado para a determinação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento, já que leva em conta não apenas a composição química mas também o tempo de resfriamento, que tem influência decisiva no tipo de microestrutura e no tamanho de grão da ZAC, é o diagrama MRT (Mitsubish Restraint Test) [37], mostrado na figura 2.4:

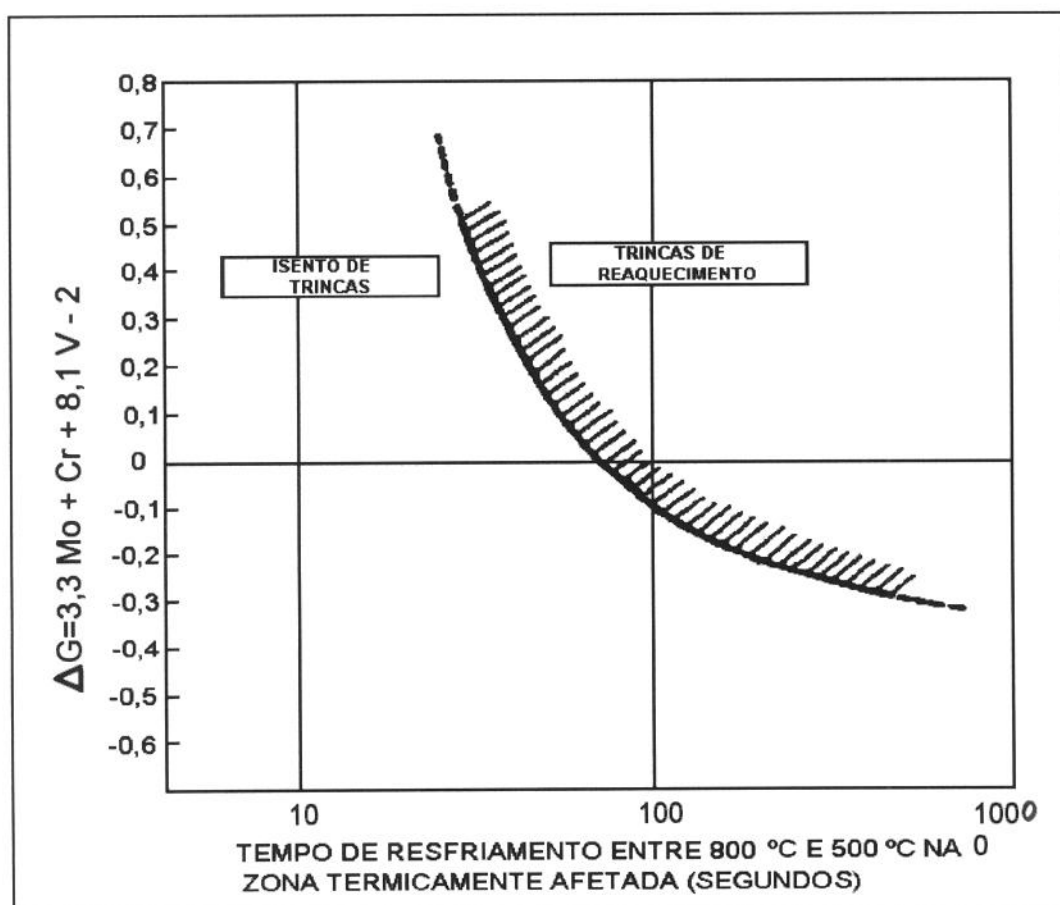


Figura 2.4- Diagrama MRT (Mitsubish Restraint Test) [37].

## 2.5- ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À TRINCA DE REAQUECIMENTO

As fórmulas baseadas na composição química e o diagrama MRT, apresentados no item 2.4, são obtidos através de fórmulas empíricas ou, no caso do diagrama MRT, fortemente dependente desta. Porém, sabemos que apesar do fenômeno "Trinca de Reaquecimento" ser função da composição



química, o conhecimento atual do problema não nos permite dizer qual elemento é mais ou menos importante, ou ainda se existe algum elemento que não esteja sendo levado em conta ou, se estiver, se está sendo levado em conta na sua devida importância. Além disso existem outros fatores tais como geometria da junta, insumo de calor, tamanho de grão da ZAC, temperatura de reaquecimento, nível de tensão, etc., que não são previstos pelos meios anteriormente descritos. Ainda, é preciso que as teorias existentes sejam apoiadas em fatos concretos, que só podem ser obtidos por meio de ensaios e testes. Por estas razões surgiram e continuam surgindo métodos práticos de ensaio de juntas soldadas para a determinação da suscetibilidade de um metal à trinca de reaquecimento.

Devido ao grande número de ensaios existentes para este fim houve a necessidade de agrupá-los e classificá-los para o melhor entendimento destes. Boniszewski [6] dividiu os testes em duas categorias:

- Testes feitos com soldagem real.
- Testes feitos com simulação de soldagem.

Já Chilque [9] agrupou os testes em 3 categorias:

- Ensaios de alívio de tensão efetuados em amostras soldadas.
- Ensaios de tração à alta temperatura, efetuados sobre amostras soldadas ou de soldagem simulada.
- Simulação de ciclo térmico de alívio de tensões sobre amostras obtidas por soldagem simulada.

Neste trabalho, para uma maior facilidade de entendimento, optou-se pela classificação de Boniszewski. A seguir estão listados alguns dos testes mais conhecidos para a determinação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento, já devidamente classificados.

Primeiro Grupo: testes feitos com soldagem real

- A. Teste de Glossop
- B. Teste de Vinckier
- C. Teste Lehigh
- D. Teste Tekken
- E. Teste de Implante Modificado

## Segundo Grupo: Testes Feitos com Simulação do Ciclo de Soldagem

- A. Teste Tipo Anel.
- B. Ensaio de Relaxação.
- C. Teste de Relaxação de Tensão.
- D. Teste de Dobramento em Três Pontos.
- E. Teste de Trinca de Alívio de Tensão.
- F. Teste de Ruptura à carga constante.
- G. Teste de Tensão à Temperatura Constante, também conhecido como Ensaio de Tração a Alta Temperatura.

Existem ainda métodos considerados auxiliares na determinação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento, podendo ser utilizados independentemente do método de obtenção da microestrutura, tais como o Ensaio Charpy e o Monitoramento por Emissão Acústica. A seguir será feita uma breve explanação sobre cada um destes métodos.

### 2.5.1- TESTES COM SOLDAGEM REAL

Os testes feitos com soldagem real tem características próprias que os diferenciam dos testes com simulação de soldagem: numa soldagem real a ZAC não é uniforme, apresentando mudanças graduais de microestrutura que influenciam o desenrolar dos testes e os tornam mais vinculados à realidade. Além disso é muito mais fácil e rápido obter uma ZAC por soldagem do que por simulação, que exige um tratamento térmico e ensaios de dureza e metalográficos para verificar se o resultado obtido foi o desejado.

Nestes testes o processo de soldagem e as variáveis do processo tais como insumo de calor, utilização ou não de pré-aquecimento, etc., são menos importantes que as condições da microestrutura (tamanho de grão, tipo de microestrutura, tamanho da ZAC, etc.) e o nível de restrição aplicado à junta antes e depois do alívio de tensões, uma vez que num estudo científico o processo e os parâmetros de soldagem são fixados enquanto que a microestrutura e o nível de tensão são as variáveis estudadas.

#### A) TESTE DE GLOSSOP [5]

Neste teste o corpo de prova é constituído de um bloco medindo 127x127x76 mm do material a ser ensaiado e de um tubo com diâmetro de 32 mm do mesmo material. Após uma soldagem multipasse, que gera tensões internas no conjunto, executa-se um tratamento térmico de alívio de tensões. Logo em seguida o corpo de prova é submetido a uma inspeção por líquido penetrante e a um exame metalográfico, de modo a se verificar a ocorrência de trincas. Uma variante deste método, também proposta por Glossop, é a utilização de um corpo de prova composto por dois blocos que são soldados de modo a se gerar tensões internas no conjunto. A figura 2.5 mostra os testes de Glossop:

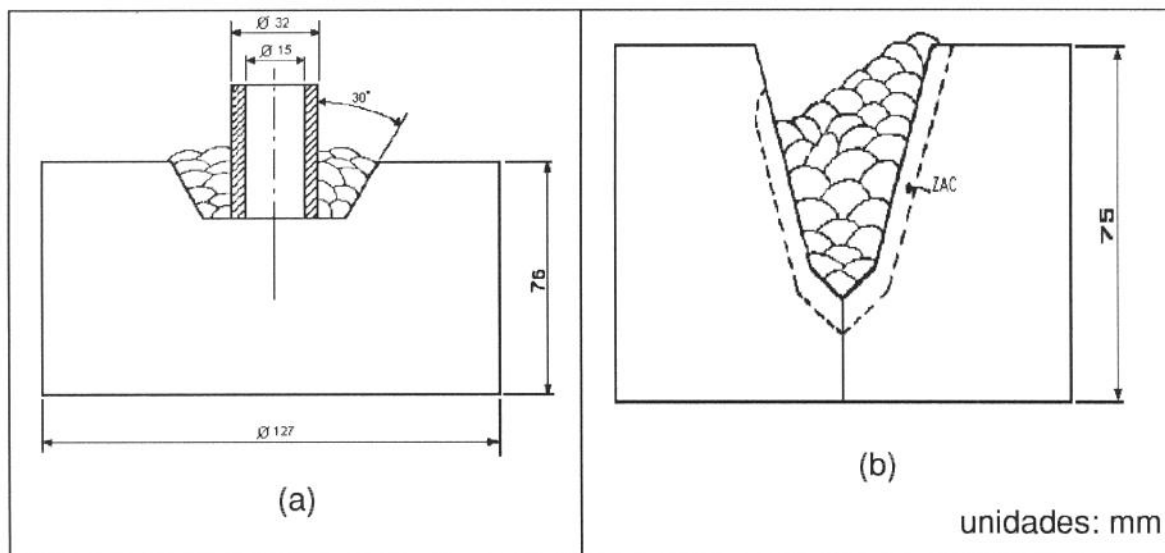


Figura 2.5: Testes de Glossop: (a) Teste de Glossop com tubo soldado, (b) Teste de Glossop com dois blocos soldados [5].

O Teste de Glossop fornece dados qualitativos do tipo trinca ou não trinca.

#### B) TESTE DE VINCKIER [5]

Este teste baseia-se na diferença entre os coeficientes de dilatação térmica entre metais diferentes para induzir tensões análogas às tensões internas produzidas pela soldagem. No teste citado por Billa [5] são utilizados o aço inoxidável austenítico e o aço carbono ferrítico, que são soldados de

maneira a induzir tensões recíprocas, que devem ser aliviadas durante o tratamento térmico sem que ocorram trincas. O teste consiste da soldagem a topo de duas chapas do aço ferrítico, medindo cada uma 200x200x30 mm, por extremidades chanfradas em duplo V, conforme se pode ver na figura 2.6-a. Após a soldagem são cortadas placas transversais à solda com 15 mm de largura, que são em seguida soldadas à chapa de aço inox, como se pode ver na figura 2.6-b. Já durante a soldagem o aço inox, por se dilatar mais, irá induzir tensões ao conjunto. Logo em seguida, após o resfriamento da solda, o conjunto soldado é levado a um forno onde ele é submetido a um TTAT, que também faz com que ocorram dilatações diferenciadas. Depois de terminado o tratamento térmico, os metais são separados e submetidos a um exame por microscopia ótica, a fim de se verificar a ocorrência ou não de trincas de reaquecimento. Na figura 2.6 podemos ver um esquema do teste:

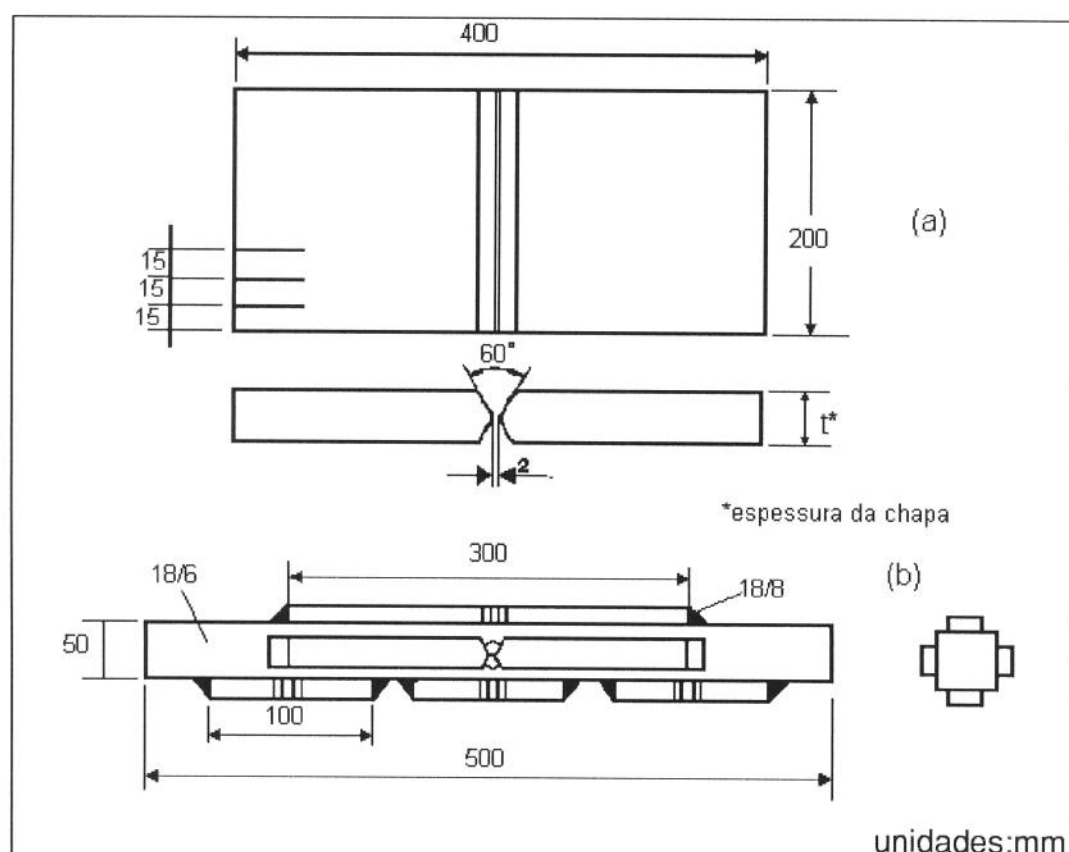


Figura 2.6- Teste de Vinckier. (a):placas de aço ferrítico, (b): conjunto aço ferrítico + aço inox [5].

O método de Vinckier também fornece informações do tipo trinca/não trinca, sendo por isso considerado um teste qualitativo.

#### C) TESTE LEHIGH [9, 26]

O teste Lehigh consiste de um bloco do metal a ser ensaiado entalhado em superfícies opostas com um rasgo passante unindo os dois entalhes, conforme ilustra a figura 2.7:

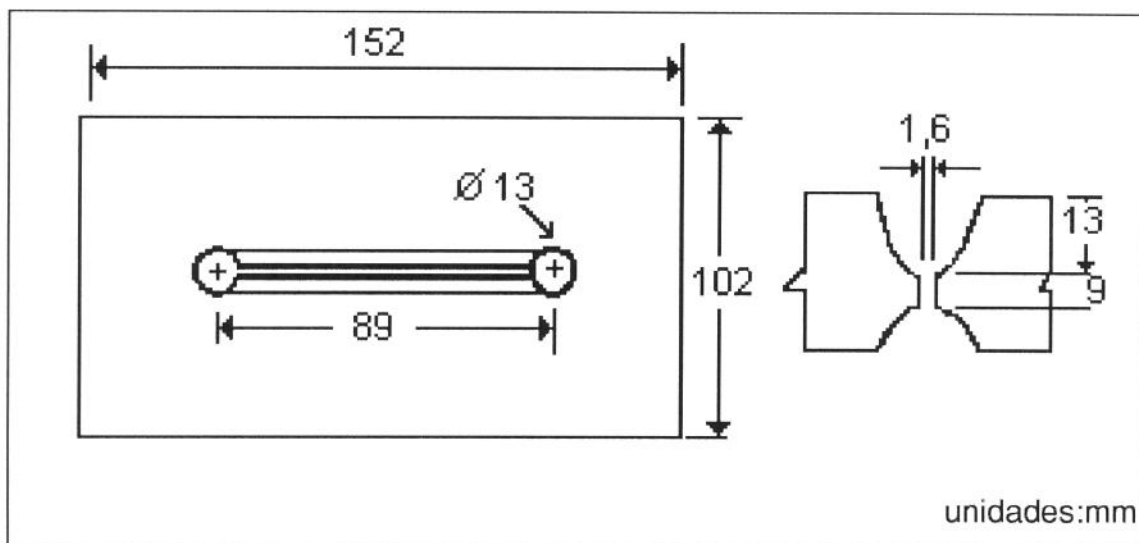


Figura 2.7: Corpo de prova para o teste Lehigh [9,26].

Os entalhes são preenchidos por metal de solda em uma soldagem multipasse, com um número de passes suficiente para o preenchimento do entalhe, gerando-se assim tensões internas no corpo de prova, que é submetido logo em seguida a um TTAT. Em seguida o corpo de prova é seccionado transversalmente ao cordão de solda para exame metalográfico que comprova a ocorrência ou não de trincas de reaquecimento. Este teste fornece informações do tipo trinca/não trinca, sendo considerado, portanto, como qualitativo.

#### D) TESTE TEKKEEN [10,15]

O teste Tekken, assim chamado por ser a abreviação do nome Tetsudo-Gijutso Kenkryusho, é um teste originalmente aplicado à trincas de Hidrogênio e regido pela norma japonesa JIS-Z 3158-1966. É considerado um teste de

alta restrição, de baixo custo, versátil e de boa repetibilidade, sendo muito usado para aços estruturais. Consiste de dois blocos chanfrados que, ao serem unidos formam um "Y". A figura 2.8 mostra o corpo de prova Tekken:

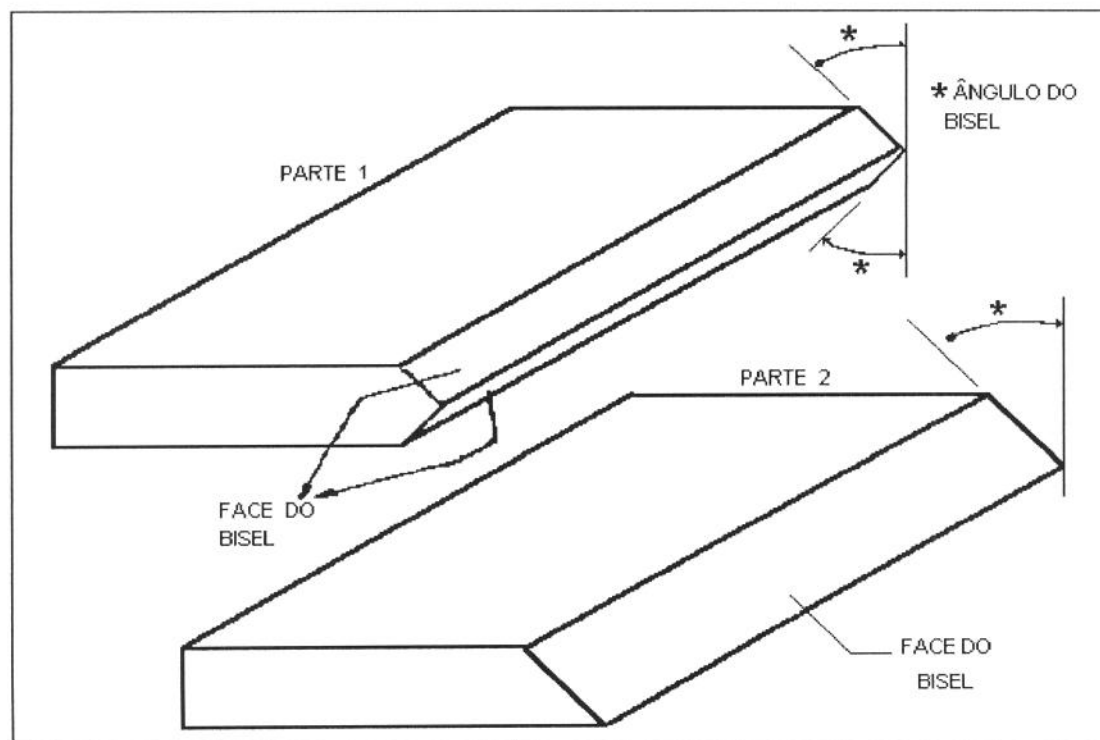


Figura 2.8- blocos chanfrados para o teste Tekken [15].

Os blocos são unidos por soldas nas pontas, chamadas soldas de restrição, devendo existir um espaço entre os blocos, conforme mostra a figura 2.9:

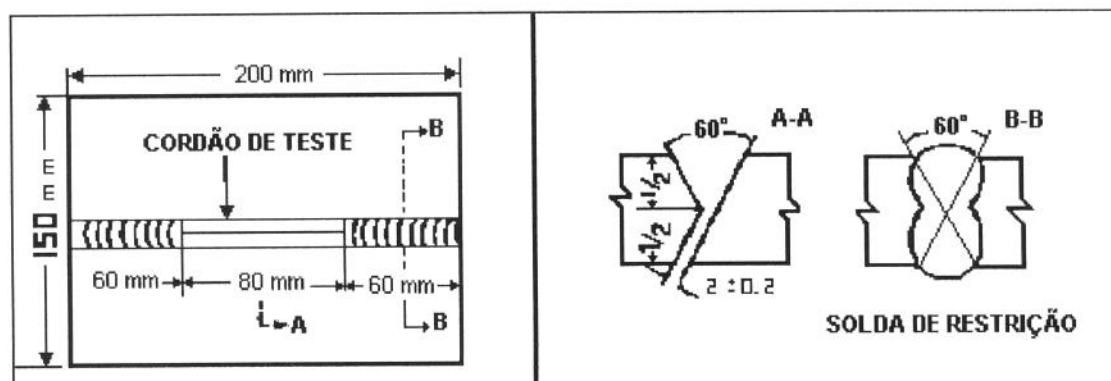


Figura 2.9- Corpo de prova para o teste Tekken [15].

Após a união dos blocos o chanfro é preenchido por solda em um único passe, com condições de soldagem controladas para se evitar a trinca de Hidrogênio. Após o resfriamento da solda o corpo de prova é submetido a um TTAT, sendo depois cortado e submetido à inspeção para se determinar se houve ou não o trincamento. Trata-se de um teste qualitativo que nos dá resultados do tipo trinca ou não trinca.

O Teste de Implante Modificado, por ser o objeto deste trabalho, será visto mais pormenorizadamente no próximo item.

## 2.5.2- TESTES FEITOS COM SIMULAÇÃO DA ZAC

Nestes testes a simulação do ciclo de soldagem é feito pelo aquecimento uniforme do corpo de prova até uma temperatura de pico previamente estabelecida seguido de resfriamento súbito, de modo a se obter uma microestrutura que simule uma ZAC obtida por soldagem real. É interessante notar que enquanto uma soldagem real apresenta uma ZAC com vários tipos de microestrutura, apresentando uma variação gradual na sua extensão, a microestrutura obtida por simulação do ciclo de soldagem em geral não apresenta variações, simulando apenas uma determinada região da ZAC real.

Os testes levados a efeito com ZACs simuladas, apesar de serem mais trabalhosos tem a vantagem de proporcionar exatamente o tipo de microestrutura que se quer estudar, além de produzir uma região homogênea com superfície livre proporcionando bastante espaço para estudos e ensaios.

### A) TESTE TIPO ANEL [5,30]

Neste teste, um cilindro de metal, do material a ser testado, tem um entalhe e um corte usinados longitudinalmente e em lados opostos, como mostra a figura 2.10.

Após a usinagem, o tubo é fechado e o lado cortado é pressionado de modo que as faces cortadas se toquem, sendo soldadas desta maneira para simular um estado de tensão próprio da soldagem. O entalhe no lado oposto

age como um concentrador de tensão de onde pode começar a ocorrer um trincamento. Feito isso, o cilindro é submetido a um TTAT e logo após inspecionado microscopicamente para se determinar a existência e extensão das trincas. Este teste fornece informações qualitativas do tipo trinca ou não trinca.

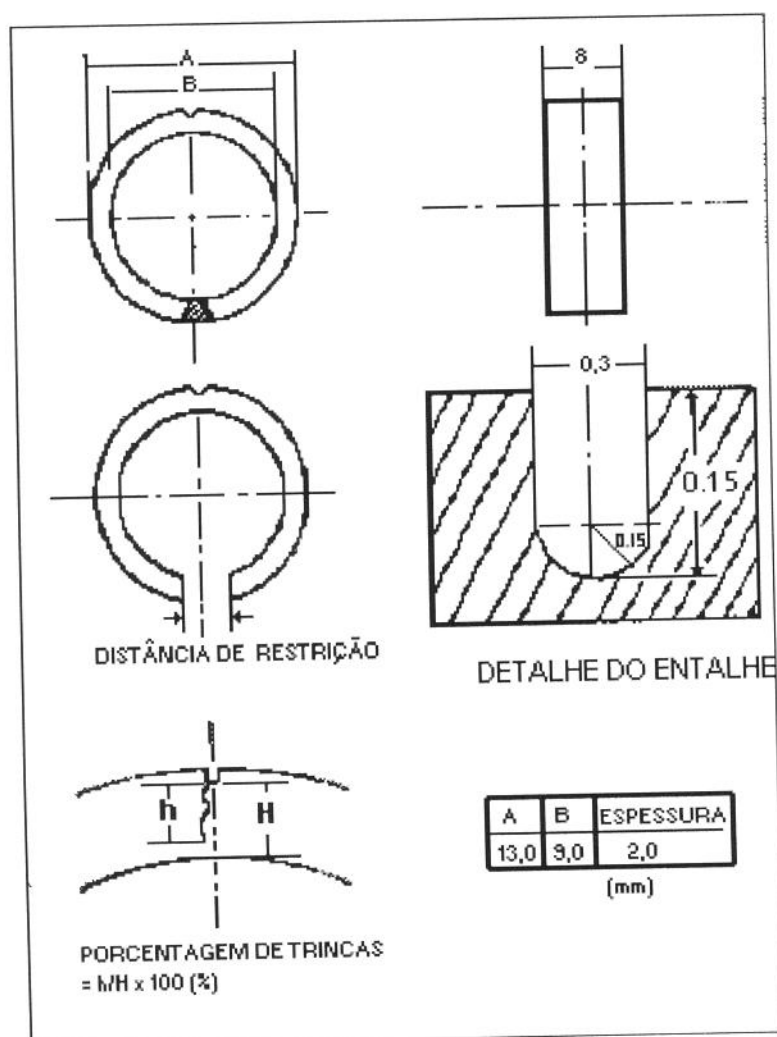


Figura 2.10- Esquema do Teste tipo anel [30].

## B) ENSAIO DE RELAXAÇÃO [2,5]

Neste teste, a suscetibilidade do material à trinca de reaquecimento é avaliada por meio do monitoramento da relaxação de tensão de um corpo de prova usinado e entalhado, como se pode ver na figura 2.11:



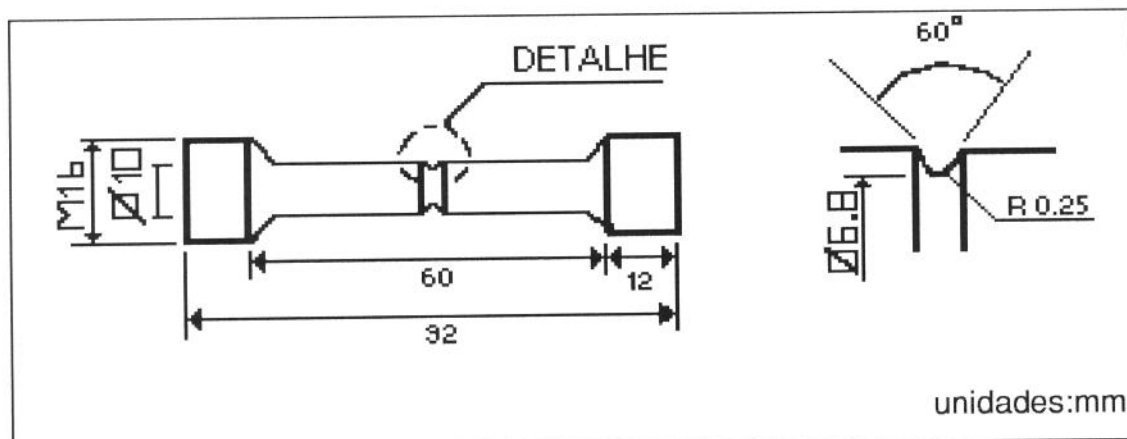


Figura 2.11- Corpo de prova para Ensaio de Relaxação de Tensões [2].

O corpo de prova é aquecido à temperatura de teste e logo após submetido a uma tensão determinada pela fórmula:

$$\sigma = f\sigma_E \frac{E_{TT}}{E_{TA}} \quad (1)$$

onde:

$\sigma_E$  = limite de escoamento do aço à temp ambiente

$E_{TT}, E_{TA}$  = módulos de elasticidade à temp de teste e temp. ambiente, respectivamente

$f$  = coeficiente de tensão inicialmente fixado em 0,8

A suscetibilidade à trinca de reaquecimento é associada com o tempo para a ocorrência da ruptura, acreditando-se que a relação seja diretamente proporcional. Pode-se, como forma de se complementar os testes, variar o valor de  $f$ , simulando-se desta maneira um campo de tensões mais ou menos intenso.

Este teste, por trabalhar com valores de tensão e tempo, pode ser considerado quantitativo.

### C) TESTE DE RELAXAÇÃO DE TENSÃO [3,26,41]

Este teste, apesar do nome ser muito parecido com o anterior, não é o mesmo. Ele é efetuado numa máquina para ensaios chamada Gleeble, muito usada para estes fins, e que, além de simular o ciclo térmico de soldagem também aplica a carga externamente, conforme se pode ver no diagrama esquemático da figura 2.12. O corpo de prova tem a forma cilíndrica, rosqueado nas pontas para a aplicação do esforço.

O teste consiste do aquecimento do corpo de prova à temperatura de teste, dando-se tempo para que a temperatura se estabilize e seja homogênea. Em seguida é aplicado um esforço de tração constante, ou seja, o corpo de prova é esticado com velocidade constante até que ocorra a fratura. O parâmetro para a determinação da suscetibilidade do material à trinca de reaquecimento é o tempo para fratura, sendo que acredita-se que a resistência à trinca seja diretamente proporcional à vida do corpo de prova. Este teste também pode ser considerado um teste quantitativo, pois trabalha com valores numéricos, ainda que a avaliação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento seja feita de forma indireta.

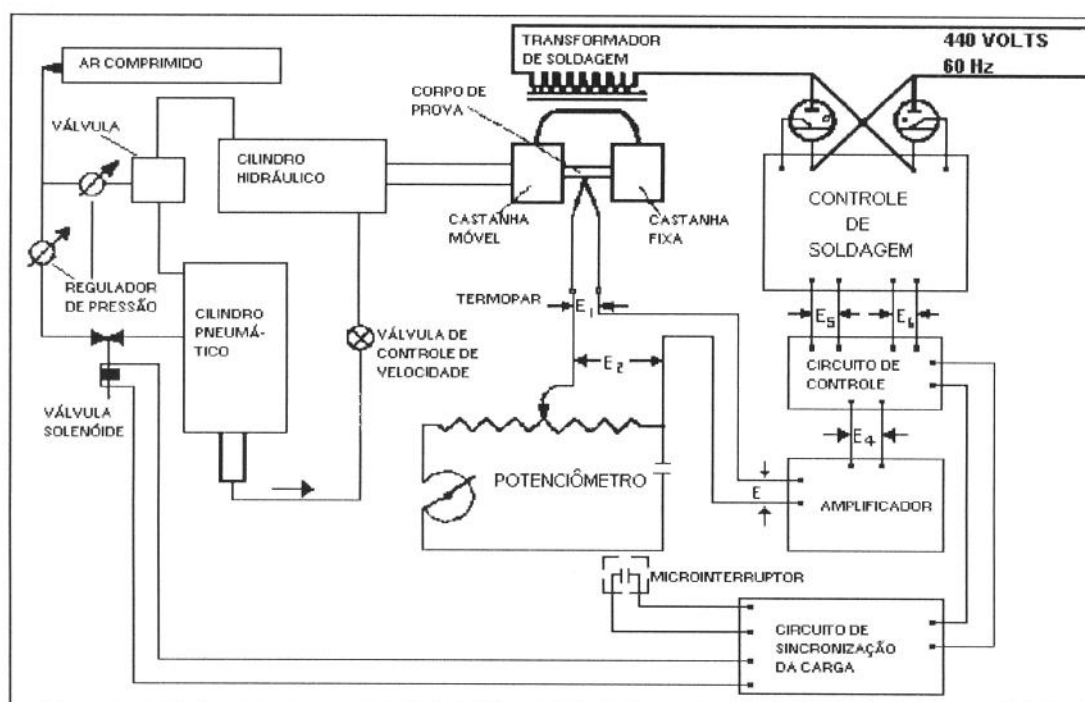


Figura 2.12- Esquema do teste de relaxação de tensão utilizando a máquina Gleeble.

#### D) TESTE DE DOBRAMENTO EM TRÊS PONTOS [30]

Neste teste, um corpo de prova usinado com o formato retangular, podendo ser entalhado no centro ou não, é vagarosamente dobrado por meio da aplicação de uma carga até que alcance um determinado nível de tensão, monitorado por um strain gage fixado no corpo de prova. O entalhe, opcional, age como um concentrador de tensão de modo a criar um campo de tensões

triaxiais. O conjunto é então submetido a um TTAT e então examinado quanto à formação e propagação de trincas de reaquecimento. A figura 2.13 mostra um desenho esquemático do teste.

Este teste foi utilizado por Nakamura [30], que extraiu dele várias informações, tais como valor de tensão e temperatura do ensaio. É um teste considerado como quantitativo em relação aos resultados.

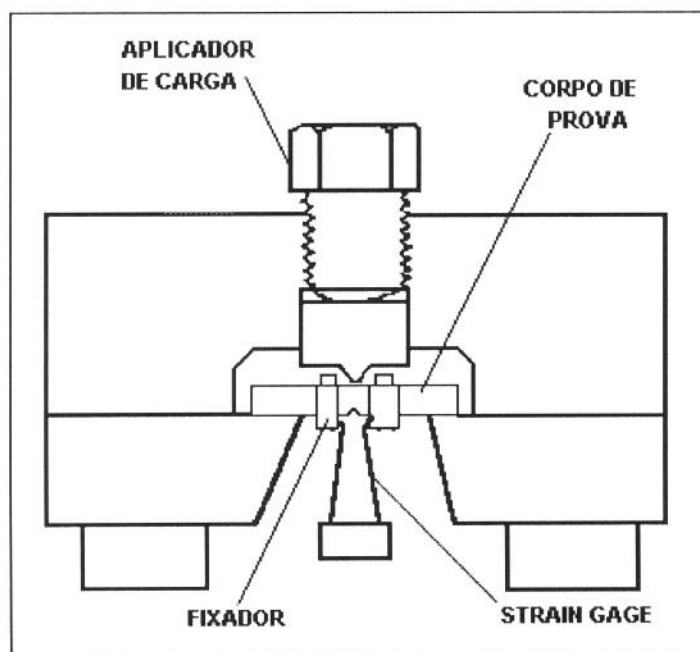


Figura 2.13- Esquema do teste de dobramento por 3 pontos [30].

#### E) TESTE DE TRINCA DE ALÍVIO DE TENSÃO

Este teste, empregado por Hipsley et al. [17], consiste de um bloco do metal a ser ensaiado usinado e entalhado conforme mostra a figura 2.14:

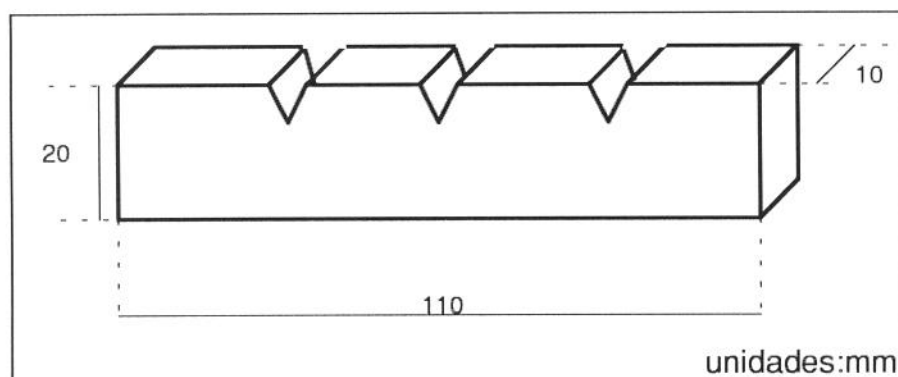


Figura 2.14- Corpo de prova para o teste de alívio de tensão de Hipsley [17].

O bloco, ao ser ensaiado, é submetido a uma tensão que pode variar entre 30 e 90% da tensão de escoamento do material, o que no entalhe proporcionará o surgimento de um campo de tensão hidrostático, ou seja, triaxial. Após a aplicação da tensão, é feito um TTAT com uma taxa de aquecimento de 100 °C/hora, até que se alcance a temperatura de 702 °C, que é então mantida por algum tempo, sendo que a tensão é mantida constante, ou seja, conforme se observa um relaxamento de tensão a solicitação é aumentada para que a tensão seja mantida constante. Após o tratamento térmico, a tensão é descarregada e o corpo de prova é resfriado a -196 °C e fraturado, a fim de se observar microscopicamente as trincas. Este teste é normalmente aplicado para se estudar o mecanismo de segregação na ponta da trinca de vários elementos residuais, entre eles o Fósforo e o Enxofre. Apesar de trabalhar com valores numéricos para a tensão e temperatura de tratamento térmico, o resultado obtido não é numérico, sendo que o teste não pode ser considerado como quantitativo, mas sim como qualitativo.

#### F) TESTE DE RUPTURA A CARGA CONSTANTE [28,41]

Este teste consiste do tracionamento de um corpo de prova e posterior aquecimento com a manutenção da carga aplicada. O corpo de prova tem o formato normal utilizado em ensaios de tração. O teste termina apenas depois da fratura. A deformação plástica que ocorre acima de 600 °C é chamada por Thamburaj et al. [41] de "Deformação Terminal" e é uma medida da suscetibilidade à trinca de reaquecimento, pois observou-se que materiais resistentes ao trincamento apresentam níveis de deformação terminal muito maiores do que os materiais suscetíveis. O teste de ruptura à carga constante é um teste que permite fazer comparações entre um tipo de material e outro quanto à suscetibilidade à trinca de reaquecimento baseado em valores numéricos de tensão, temperatura e deformação terminal, sendo portanto considerado um teste quantitativo.

## G) TESTE DE TENSÃO À TEMPERATURA CONSTANTE

Também conhecido como Ensaio de Tração a Alta Temperatura [5, 10].

Neste teste, após a simulação do ciclo de soldagem, o corpo de prova é reaquecido e mantido à temperatura de teste, previamente determinada. Tão logo esta temperatura seja alcançada, o corpo de prova é vagarosamente deformado até fraturar, quando então é medida a estricção, ou redução da seção transversal do corpo de prova. De posse deste dado, é possível classificar o material em uma das 4 categorias a seguir:

1. EXTREMAMENTE SENSÍVEIS: se a estricção à 600 °C for inferior a 5% para um pico de temperatura de simulação de soldagem maior que 1300 °C.
2. SENSÍVEIS: se a estricção for menor que 10% para as mesmas condições citadas acima.
3. LIGEIRAMENTE SENSÍVEIS: se a estricção for inferior a 15%, para um pico de temperatura de simulação de soldagem maior que 1350 °C.
4. NÃO SENSÍVEIS: se a estricção for superior à 20% para qualquer pico de temperatura de simulação de soldagem.

Este teste fornece dados quantitativos tais como tempo de ruptura, tensão aplicada, estricção, etc., que permitem uma comparação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento baseado em valores numéricos.

### 2.5.3- MÉTODOS AUXILIARES NA DETERMINAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À TRINCA DE REAQUECIMENTO

#### A) ENSAIO CHARPY [37]

É um ensaio de impacto que testa a suscetibilidade do metal à fratura frágil. Como este modo de fratura é um dos mecanismos que ocorrem durante o trincamento por reaquecimento, torna-se válido a aplicação deste teste à trinca de reaquecimento. Trata-se de um ensaio bastante difundido a nível mundial, sendo normalizado por vários órgãos internacionais. O corpo de prova tem o formato de uma barra retangular e é entalhado de modo a proporcionar um local de iniciação da trinca e um estado triaxial de tensões

quando da ocasião do impacto. O ensaio se dá da seguinte maneira: o corpo de prova é fixado de modo que o impacto se dê na superfície oposta ao entalhe. Feito isto, a partir de uma altura determinada é solto um martelo pendular que se choca com o corpo de prova, ocasionando um trincamento ou não. O parâmetro medido é a energia absorvida pelo corpo de prova, que pode ser obtida por meio de equações a partir do peso do martelo e da altura atingida pelo martelo antes e depois do impacto. Existem máquinas de ensaio Charpy com uma graduação de altura do martelo em unidades de energia, não necessitando de fórmulas para se obter a energia de impacto. É um ensaio cujos resultados podem ser expressidos em números, razão pela qual pode ser considerado como quantitativo.

#### B) MONITORAMENTO POR EMISSÃO ACÚSTICA [17,23]

O monitoramento do processo de soldagem por meio da emissão acústica é uma técnica recente que se baseia na propriedade de certos materiais, entre eles os metais, de emitirem energia na forma de ondas quando submetido a estímulos externos. Esta energia está situada na faixa de comprimento de onda do ultra-som, porém o monitoramento por emissão acústica não pode ser confundido com o monitoramento por ultra-som devido a uma diferença fundamental: enquanto no monitoramento por ultra-som a energia é emitida de uma fonte externa ao material, sendo captada após reverberar no seu interior, no monitoramento por emissão acústica a energia é gerada pelo próprio material, sendo captada por sensores acoplados na superfície da peça. Um material pode emitir ondas de E.A. nas seguintes situações:

- Fratura das células cristalinas,
- Fratura das inclusões no material,
- Transformações de fase (por exemplo a formação da Martensita)
- Descargas elétricas.

Como se sabe, a trinca de reaquecimento é um tipo de fratura, ainda que intercristalina, gerando então ondas de emissão acústica durante a sua ocorrência.

Na figura 2.15 pode-se ver o esquema de um aparato de monitoramento de emissão acústica utilizado por Hipsley et al. [17] para o estudo da trinca de reaquecimento:

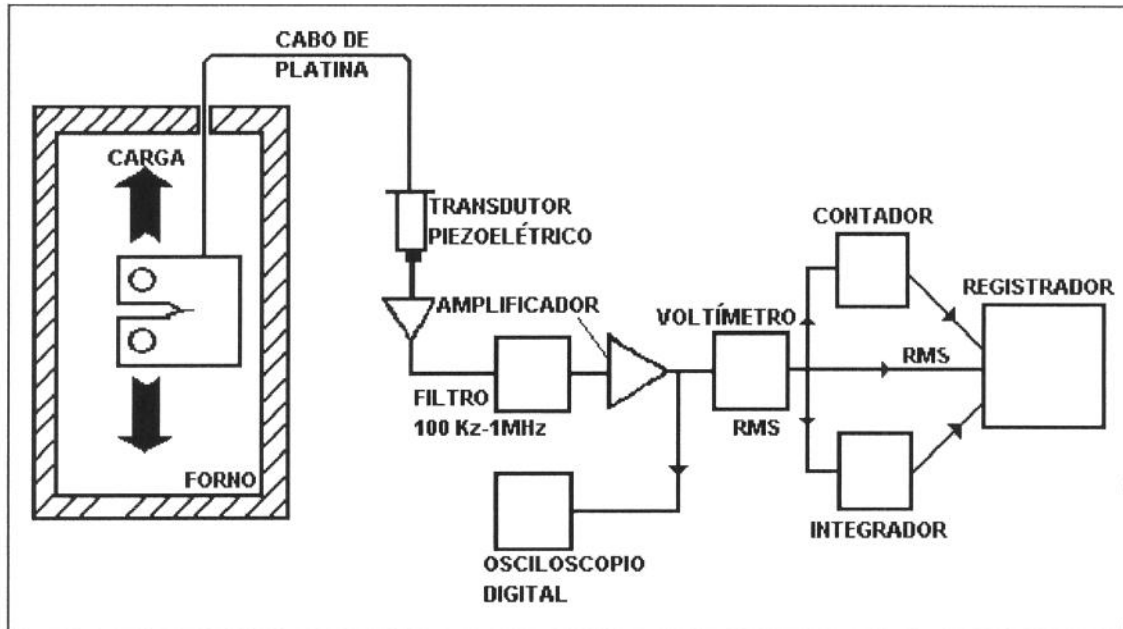


Figura 2.15- Aparato de monitoramento por emissão acústica [17].

Como se pode ver na figura 2.15, o corpo de prova é aquecido dentro de um forno e submetido a um esforço de tração enquanto um transdutor piezoelétrico, ligado ao corpo de prova por meio de um cabo de platina, recebe as ondas de emissão acústica e as transforma em sinais analógicos, que são filtrados de interferências e amplificados para evitar a perda do sinal. O sinal analógico pode ser monitorado visualmente em um osciloscópio digital enquanto um voltímetro RMS altera a frequência do sinal, de modo que ele possa ser trabalhado em computador. Após passar pelo voltímetro RMS, o sinal pode ser gravado ou pode passar por um contador ou por um integrador antes de ser gravado. O monitoramento por EA, além de trabalhar com valores numéricos, tem a vantagem de ser muito sensível, detectando até mesmo a formação das microtrincas que antecedem a formação das trincas de reaquecimento. É uma técnica considerada quantitativa, por fornecer valores numéricos como resultado.



## 2.6- O TESTE DE IMPLANTE MODIFICADO

O Teste de Implante Modificado é um teste utilizado para a determinação da suscetibilidade de um metal à trinca de reaquecimento. É feito com soldagem real, o que, de acordo com a classificação adotada neste trabalho, o inclui no primeiro grupo. Não é um teste auto-restritivo ou seja, a tensão imposta ao corpo de prova provém de fonte externa. Este teste é uma versão modificada do teste de implante, universalmente utilizado na avaliação da suscetibilidade de materiais soldáveis à trinca de Hidrogênio durante a soldagem, que se dá por outros motivos: contaminação por Hidrogênio durante a soldagem; presença de microestrutura sensível (martensita e/ou bainita) e presença de tensões de tração na junta, mas que num exame micrográfico pós-trincamento poderia vir a ser confundida com a trinca de reaquecimento, devido ao fato de que ambas as trincas podem ocorrer em regime frágil. Por este motivo serão vistos mais à frente, quando tratarmos das técnicas experimentais, os procedimentos adotados para a certificação do tipo de trinca estudada.

A adaptação do teste de implante para o estudo da trinca de reaquecimento foi proposta originalmente por Granjon [40] e desde então o teste de implante modificado tem sido utilizado ou citado por diversos pesquisadores [9,11,13,40]. Por ser um teste relativamente novo (sua primeira citação data de 1973 [40]) não foi ainda normalizado, seguindo tanto quanto possível os procedimentos e recomendações do Teste de Implante [35].

O equipamento para o teste é composto por 3 sistemas interativos:

- SISTEMA DE TRAÇÃO, composto por um sistema hidráulico e pela estrutura metálica do equipamento, com a função de tracionar o corpo de prova, simulando um estado de tensões internas tal como se verifica em juntas soldadas.
- SISTEMA DE AQUECIMENTO, composto por um forno elétrico com a função de efetuar um tratamento térmico de alívio de tensões no corpo de prova soldado.
- SISTEMA DE MONITORAMENTO, com a função de monitorar o alívio de tensões, assim como a eventual ocorrência de trincas.



O procedimento de teste resume-se basicamente na soldagem de um corpo de prova montado em um furo feito em uma placa do mesmo material de modo que o corpo de prova fique em posição perpendicular à placa. Em seguida à soldagem e após a temperatura da solda baixar, aplica-se um esforço de tração ao corpo de prova de modo a simular um estado de tensões análogo ao verificado em juntas soldadas onde ocorreu a trinca de reaquecimento. Depois de algum tempo, aproximadamente 1 hora, faz-se um tratamento térmico de alívio de tensões, quando então se verifica a ocorrência ou não das trincas de reaquecimento. A figura 2.16 mostra um esquema da placa de teste e da soldagem do corpo de prova à placa.

A literatura mostra que apesar do teste de implante modificado ter sido proposto originalmente por Granjon [40], na versão conhecida por teste do duplo implante, o teste tem sido utilizado atualmente por dois grupos principais: Tamaki e Suzuki, no Japão, e Ferraresi et al., no Brasil. Cada um dos pesquisadores projetou um equipamento de teste que mais se adaptasse às suas necessidades. A figura 2.17 mostra o equipamento para o teste de implante modificado tal como foi proposto originalmente por Tamaki e Suzuki [40].

Este equipamento foi o primeiro a ser construído para o teste de implante modificado e tinha duas versões: uma para um corpo de prova de maior comprimento (180 mm), chamada de primeiro tipo de máquina, e outra para um corpo de prova de menor comprimento (70 mm), chamada de segundo tipo de máquina. A primeira, como se pode ver na figura 2.17, tinha um sistema de tração com aplicação de força direta, pelo simples apertar de uma porca. A segunda tinha uma maneira um pouco diferente de aplicação de carga, por meio de uma alavanca, conforme se pode ver na figura 2.18, que detalha a porção inferior do equipamento.

Segundo os autores, esta modificação tinha como objetivo evitar a torção da célula de carga e do corpo de prova, visto que a primeira não suportaria este tipo de solicitação e o segundo não deve apresentar esforços desta natureza se quiser simular com fidelidade um estado de tensões internas em uma junta soldada.

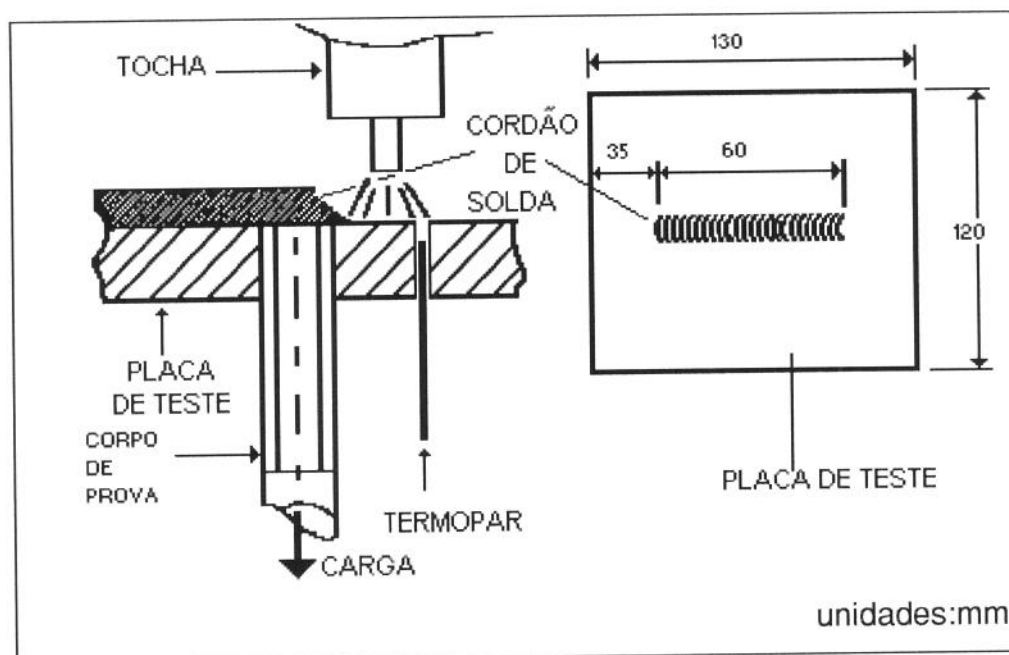


Figura 2.16- Esquema de fixação do corpo de prova à placa de teste e detalhamento das dimensões da placa e do cordão [13].

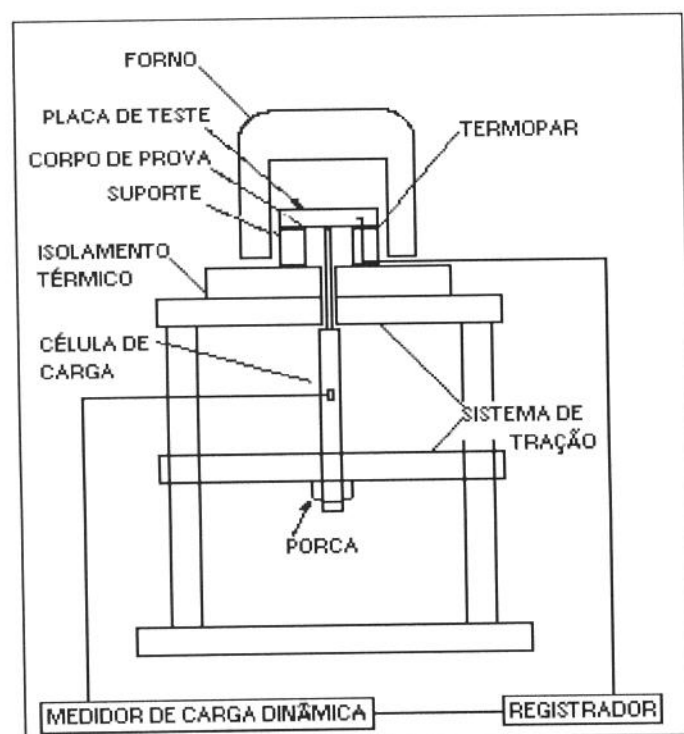


Figura 2.17- Equipamento projetado por Tamaki e Suzuki[40].

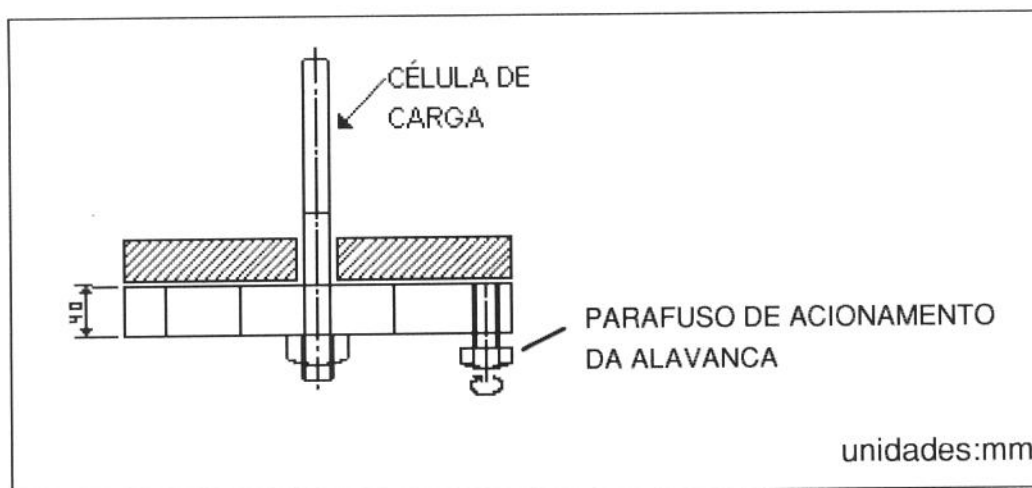


Figura 2.18- Sistema de tracionamento por alavanca.

Ainda sobre este equipamento é interessante citar o uso de suportes para a placa de teste (vide figura 2.17), feitos do mesmo material da placa, que tem o objetivo de atuarem como compensadores térmicos. Estes compensadores, quando submetidos ao aquecimento do tratamento térmico, sofreriam uma dilatação e deslocariam a placa de teste para cima, enquanto que o corpo de prova, também devido ao aquecimento do tratamento térmico, se dilataria e se deslocaria para baixo. Estes dois deslocamentos em sentidos contrários se anulariam ou se minimizariam de modo a evitar que a dilatação térmica do corpo de prova possa ser confundida com um alívio de tensão.

O uso deste sistema é discutível, pois a dilatação térmica do corpo de prova nunca poderá ser completamente anulada devido ao fato do corpo de prova e dos compensadores serem do mesmo material, com o mesmo coeficiente de dilatação térmica linear, e do corpo de prova ter maior comprimento do que os compensadores, o que faria com que, dada uma mesma diferença de temperatura, o corpo de prova apresentar maior dilatação que os compensadores. Esta diferença de dilatação seria difícil de ser estimada, pois o corpo de prova não fica inteiramente dentro do forno não se podendo, portanto, garantir a sua temperatura em toda a sua extensão. Desta maneira o uso dos compensadores térmicos, ao invés de colaborar com a eficiência do teste poderia se tornar um embaraço para esta.

Em um trabalho mais recente, Ferraresi et al. [13] utilizaram uma versão mais recente deste equipamento, utilizando sistemas mais avançados de monitoramento, aquecimento e tração. A figura 2.19 mostra um diagrama do equipamento utilizado:

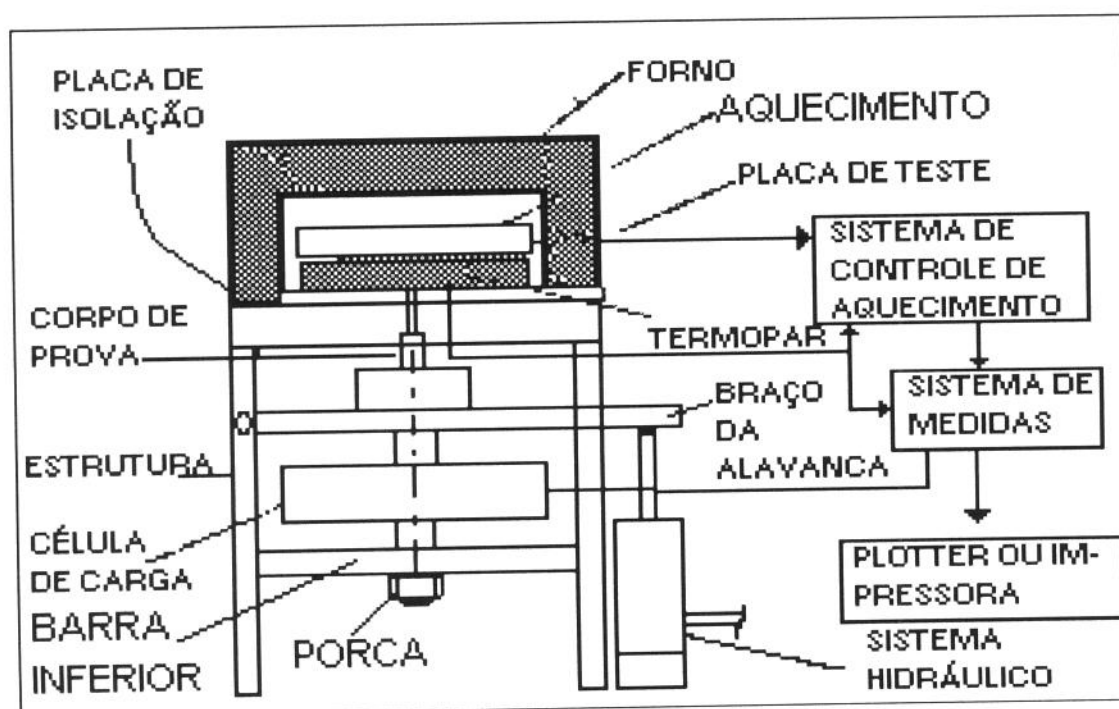


Figura 2.19- Equipamento para teste de implante modificado tal como projetado por Ferraresi et al.[13].

No equipamento em questão, o sistema de aquecimento era comandado por um controlador do tipo Variac, liga-desliga, e os dados do ensaio eram traçados por um registrador gráfico x,y. O sistema de tração funciona da seguinte maneira: acionando-se o cilindro hidráulico (vide figura 2.19), uma força de tração é imposta ao sistema, ficando porém restrita entre a barra inferior e o braço de alavanca acionado pelo cilindro. Quando se alcança o valor de tração desejado, monitorado pela célula de carga, trava-se o sistema, depositando-se um cordão de solda sobre o corpo de prova e a placa de teste (vide figura 2.16). No momento oportuno, quando o ensaio assim o exigir, alivia-se a pressão do cilindro hidráulico e a força de tração é transmitida ao corpo de prova.

Apesar do teste do equipamento para o teste de implante modificado apresentar variações, o corpo de prova não tem sido substancialmente alterado, tendo apenas as suas dimensões variadas. Composto do material a ser testado, ele é usinado e entalhado conforme mostra a figura 2.20, onde se pode ver um dos tipos de corpos de prova utilizados na pesquisa da trinca de reaquecimento:

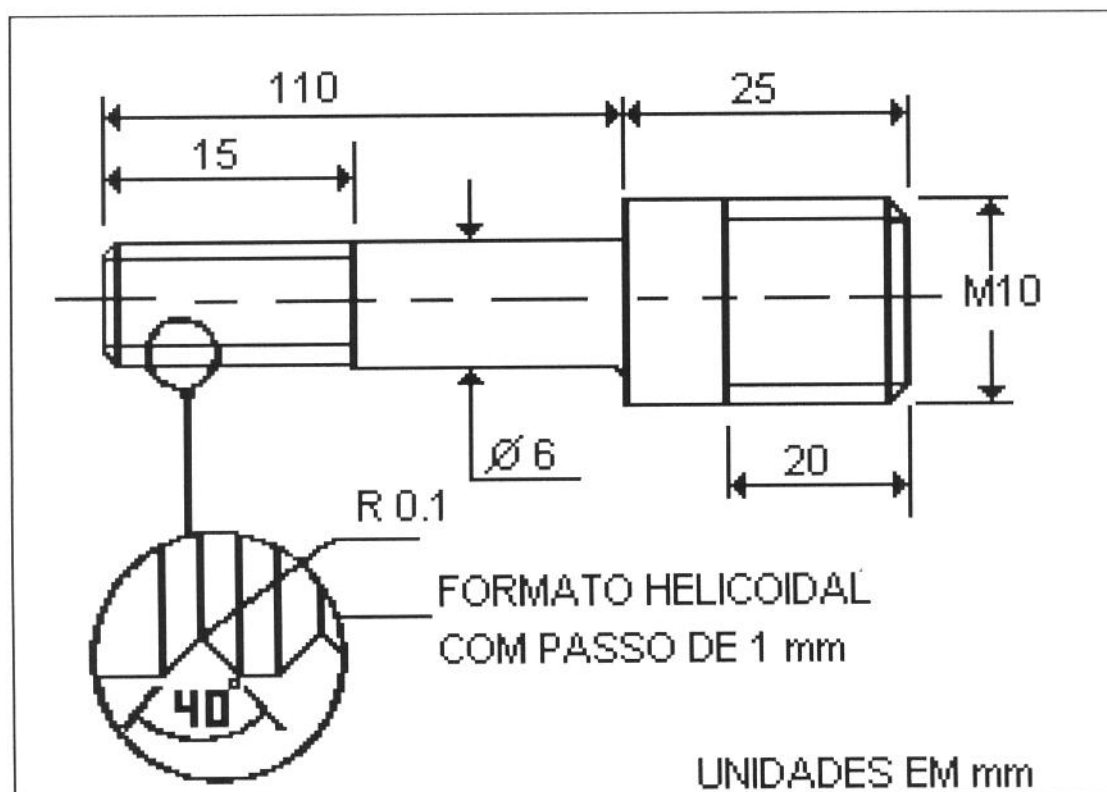


Figura 2.20- Esquema de um corpo de prova com detalhamento da região entalhada [13].

O entalhe tem uma geometria bem definida e é feito de tal forma que se localize na região da ZAC. Durante a aplicação da força de tração, o entalhe age como um concentrador de tensão, criando um campo de tensão hidrostática de onde pode se iniciar uma trinca. O comprimento total do corpo de prova não é fixo, existindo recomendações [35] para o teste de implante para que o corpo de prova seja maior que 30 mm (proposta francesa) ou fique entre 30 e 200 mm (proposta japonesa). É claro que no teste de implante não existe reauecimento, não existindo então preocupações com a dilatação térmica do corpo de prova e suas consequências. Para o teste de implante

modificado deve-se tentar trabalhar com o menor comprimento possível para o corpo de prova, a fim de que a dilatação deste não seja confundida com o relaxamento da tensão de tração, mascarando desta forma os resultados do teste.

O teste fornece resultados na forma de valores de tensão, que, juntamente com a temperatura, são traçados graficamente em função do tempo em um gráfico, conforme pode ser visto na figura 2.21, onde:

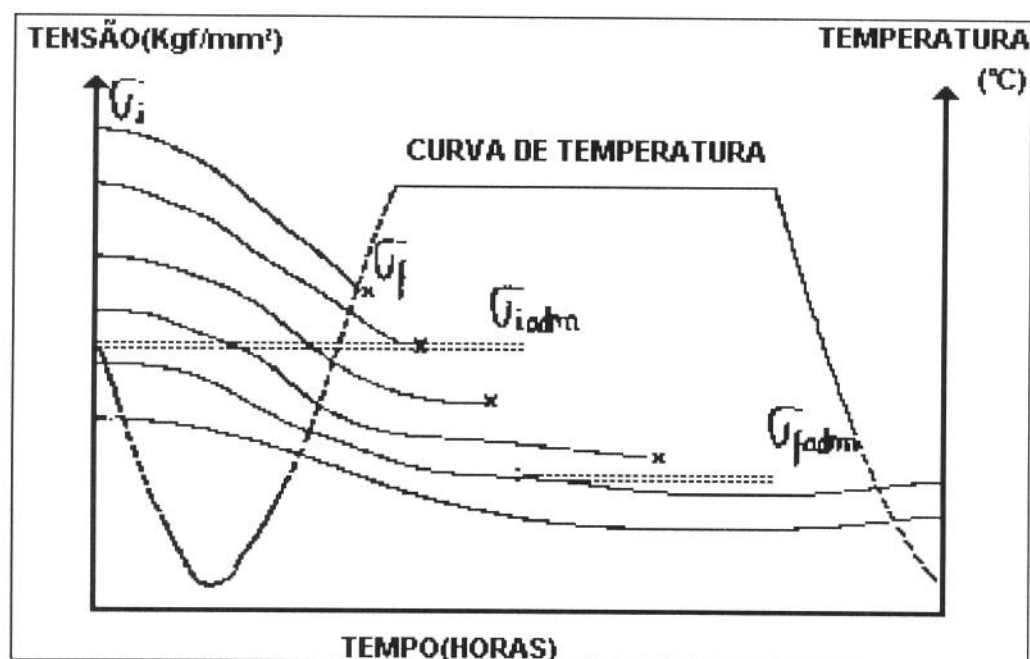


Figura 2.21- Gráfico Tensão x Temperatura x Tempo, típico do teste de implante modificado [13].

$\sigma_i$  = valor da tensão de tração aplicada ao corpo de prova no início do teste.

$\sigma_i \text{ adm.}$  = valor máximo da tensão de tração para o qual não ocorre trinca de reaquecimento durante o teste.

$\sigma_f$  = valor da tensão de tração após a relaxação para o qual ocorre a trinca.

$\sigma_f \text{ adm.}$  = valor máximo admissível de tensão após o relaxamento para o qual não ocorre a trinca de reaquecimento.

Os pontos assinalados por um "X" indicam o término de um ensaio com a ruptura do corpo de prova; as curvas que não terminam com um "X" indicam

ensaios onde não ocorreu ruptura no corpo de prova. Estes corpos de prova, após o ensaio, são analisados quanto à ocorrência e propagação de microtrincas. O principal parâmetro medido no ensaio é a tensão inicial aplicada ao corpo de prova ( $\sigma_i$ ), e o valor máximo admissível para o qual não ocorrem trincas ( $\sigma_i$  adm.) serve como valor de referência para a comparação com outros tipos de aços quanto à suscetibilidade à trinca de reaquecimento.

O teste de implante modificado tem características próprias que representam uma evolução em relação aos testes citados anteriormente [40], tais como:

- A ZAC é obtida por soldagem real, o que faz com que ela apresente graduações de textura e microconstituintes tais como se observa na prática.
- Pode-se simular vários estados de tensão interna variando-se a tensão aplicada.
- A relaxação de tensão durante o tratamento térmico pode ser monitorada.
- O ensaio tem boa repetibilidade, sendo representativo sem exigir um número grande de corpos de prova, o que representa uma vantagem do ponto de vista econômico.

Como pode-se ver, o teste de implante modificado fornece como resultados valores numéricos de tensão inicial e final, além de trabalhar com valores de temperatura e tempo. Quanto maior for o valor da tensão máxima admissível no começo do teste ( $\sigma_i$  adm.), menor será a suscetibilidade à trinca de reaquecimento. Não se deve, porém, considerar estes valores resultantes do teste como valores absolutos, acima dos quais sempre haverá a trinca e abaixo dos quais a trinca nunca se verificará para aquele determinado tipo de aço ensaiado. É importante colocar que apesar do teste de implante modificado apresentar características que o aproximam bastante da realidade, existem ainda fatores importantes que não são levados em conta, como por exemplo a geometria da junta, razão pela qual os valores de tensão obtidos devem ser tomados como valores relativos, úteis para a comparação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento entre os vários materiais que apresentam este problema.



### **CAPÍTULO 3- PROJETO E CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA O TESTE DE IMPLANTE MODIFICADO**

Baseado nos equipamentos anteriormente projetados (item 2.6), este capítulo trata do projeto de um equipamento que represente um avanço tecnológico e operacional. Este trabalho não se propõe a inventar ou criar um novo equipamento, mas sim a otimizar e aperfeiçoar os equipamentos para o teste de implante modificado utilizado atualmente, tentando introduzir determinados melhoramentos. O equipamento projetado neste trabalho é composto por tres simstemas interativos, detalhados a seguir:

⇒ O sistema de aquecimento,composto por:

- um forno de tratamento térmico com abertura em um dos seus lados,
- um controlador programável do tipo rampa e patamar e um módulo de potência,
- um termopar, conectado ao controlador do forno.

Neste trabalho procurou-se melhorar o sistema de aquecimento através do projeto e construção de um forno de alta eficiência, cuja potência esteja em afinidade com as exigências do teste e que utilize revestimentos altamente isolantes e refratários, além de equipamentos de controle de temperatura que proporcionem grande precisão nos ciclos térmicos de aquecimento, manutenção de temperatura e resfriamento.

⇒ O sistema de tração, composto de:

- Um cilindro hidráulico,
- Uma bomba hidráulica manual e suas respectivas conexões
- A estrutura metálica do equipamento.

Neste sistema, introduziu-se uma melhoria através da utilização de dispositivos que garantam que o esforço de tração atue numa única direção, de modo a ter uma única componente, vertical.

⇒ O sistema de monitoramento, composto por:

- Uma célula de carga,
- Um indicador digital de pesagem e um transmissor analógico de pesagem,
- Um termopar



-Uma placa A/D, que recebe os sinais analógicos de carga, por meio do transmissor analógico de pesagem, e de temperatura, por meio do termopar, e os converte em sinais digitais,

-Um microcomputador, com softwares para o processamento dos dados recebidos pela placa A/D.

Neste sistema procurou-se introduzir melhorias através da utilização de uma célula de carga de última geração acoplada a um indicador de pesagem que permita o monitoramento do esforço de tração em tempo real, e também de um conversor analógico/digital, que permita coletar e processar os dados de tensão e temperatura em um microcomputador.

Assim, este capítulo será dividido em 3 partes, cada uma tratando pormenorizadamente do projeto e construção de cada sistema separadamente.

### 3.1-O SISTEMA DE AQUECIMENTO

O projeto do sistema de aquecimento consiste principalmente do projeto de um forno para tratamento térmico de metais. Também deve se atentar para as consequências de um aquecimento na estrutura metálica do equipamento.

#### 3.1.1- PROJETO

Para se fazer um tratamento térmico de metais em um forno, podem-se utilizar fornos tanto de combustão quanto elétricos. Neste trabalho optou-se pelo uso de um forno elétrico de aquecimento por resistência de ação indireta[22] por se considerar fatores tais como facilidade de construção, operação e manutenção, segurança e eficiência. O projeto e a construção de um forno especialmente para o teste de implante modificado traz algumas vantagens, tais como:

- ✓ O forno pode ser confeccionado separadamente da soleira, o que é uma característica que não se encontra em fornos comerciais.
- ✓ A potência do forno é ajustada especificamente para o desempenho desejado no teste, permitindo uma maior facilidade de ajuste e controle de temperatura,garantindo maior precisão ao teste.

A pesquisa dos materiais para o forno foi também uma parte importante do trabalho, uma vez que a eficiência do forno está diretamente relacionada com a eficiência de seus componentes. Para o isolamento térmico optou-se pelo material conhecido como "Placa Duraboard 1200", fabricado pela Carborundum do Brasil, constituído basicamente por Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e Óxido de Silício ( $\text{SiO}_2$ ) unido por ligantes orgânicos. Na tabela 3.1 estão listadas algumas das características do material, que foram fornecidas pelo fabricante:

Tabela 3.1- Propriedades físicas típicas da Placa Duraboard 1200 [7]

Cor	BRANCA
Temperatura Limite para uso Contínuo	1260 °C
Ponto de Fusão	1760 °C
Densidade Nominal	220 a 330 Kg/m <sup>3</sup>
Perda por Ignição	4,6 %
Condutividade Térmica (K)	600 °C-0,094 W/m°C 982 °C-0,224 W/m°C

Quanto ao elemento de aquecimento, optou-se pela resistência elétrica "Kanthal A-1", conhecida por sua alta durabilidade e resistência a altas temperaturas. O elemento foi adquirido em forma de fios e enrolado no diâmetro mais conveniente. A tabela 3.2 lista algumas características do material, dadas pelo fornecedor:

Tabela 3.2- Algumas características do fio Kanthal-A1 [20]

Temperatura Máxima para uso constante (Temperatura do Elemento)	1375 °C
Composição Química (% em peso)	Cr-2,2 Al-5,5 Fe-restante
Resistência Elétrica Específica à 20 °C	1,45 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
Coeficiente de Dilatação Linear (adimensional)	20-250 °C-11.10 <sup>-6</sup> 20-500 °C-12.10 <sup>-6</sup> 20-750 °C-14.10 <sup>-6</sup>
Condutibilidade Térmica Específica à 20 °C	16 W.m <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup>
Capacidade Térmica Específica	0,46 KJ.Kg <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup>
Ponto de Fusão	1500 °C
Propriedades Magnéticas	MAGNÉTICO

Os cálculos para o dimensionamento do forno foram baseados em equações de transferência de calor [18] e em manuais técnicos [20,33].

### CÁLCULO DO FORNO

#### a) Áreas de perda de calor:

Com o objetivo de se facilitar o cálculo, as áreas de perda de calor foram divididas em teto, soleira e paredes, pois a transferência de calor por convecção varia de acordo com a posição da superfície. Na figura 3.1 estão representadas estas superfícies.

Teto:  $0,400 \times 0,350 = 0,140 \text{ m}^2$

Parede 1:  $0,400 \times 0,250 = 0,100 \text{ m}^2$

Parede 2:  $0,350 \times 0,250 = 0,088 \text{ m}^2$

Soleira:  $0,400 \times 0,350 = 0,140 \text{ m}^2$

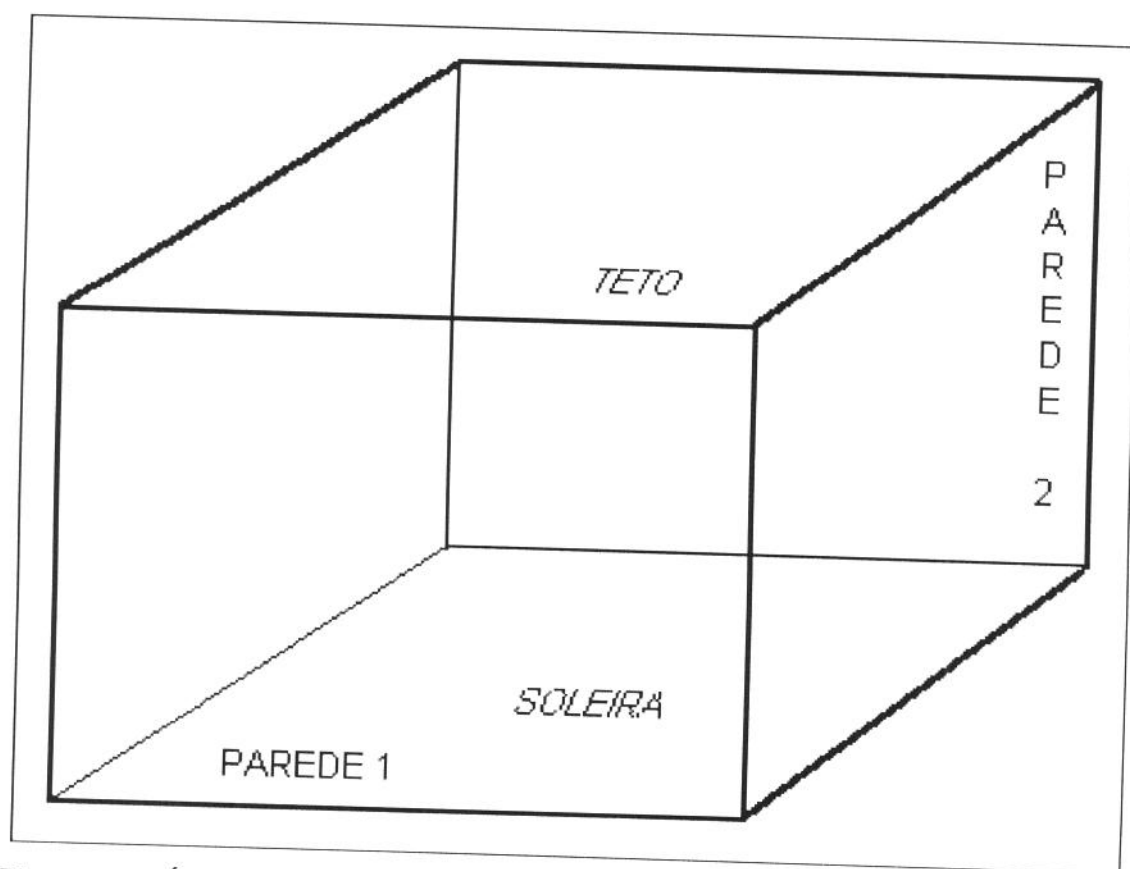


Figura 3.1- Áreas de troca de calor do forno.

b) As perdas de calor pelas paredes, teto e soleira se darão por meio de condução e convecção, sendo calculadas pelo coeficiente global de transferência de calor, da seguinte maneira:

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{KA} + \frac{1}{h_2 A}} \quad (2)$$

onde:

q= calor perdido para o ambiente [W]

TA= Temperatura no interior do forno [°C].

TB= Temperatura no ambiente externo [°C].

A= Área de troca de calor [m²].

Δx = Espessura do isolamento [m].

h1, h2= Coeficientes de transferência de calor por convecção [W/m² °C], sendo que o coeficiente 1 se refere ao interior do forno e o coeficiente 2 se refere ao exterior do forno.

K= Condutividade térmica do material das paredes, teto e soleira [W/m°C].

A placa de teste será apoiada em 4 pontos por pastilhas de cerâmica, para que não exista aplicação de força sobre o isolante térmico da soleira. A perda de calor pelos apoios de cerâmica se dará apenas por condução e será calculada mais adiante.

O cálculo dos coeficientes h1 e h2 são feitos por meio de equações simplificadas, aplicáveis quando a convecção não é forçada e o meio ambiente externo é o ar:

♦ Placa horizontal, face aquecida voltada para cima:(soleira)

$$h = 1,32 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

(REGIME LAMINAR)

♦ Placa horizontal, face aquecida voltada para baixo:(teto)

$$h = 0,61 \left( \frac{\Delta T}{L^2} \right)^{\frac{1}{5}} \quad 4)$$

♦ Plano vertical:(paredes)

$$h = 1,42 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

onde:

$h$ = coeficiente de troca de calor por convecção [ $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ].

$\Delta T$ = (Temperatura da parede)-(temperatura no infinito), ou seja, a alguma distância da parede, [ $^\circ C$ ]

$L$ = Dimensão horizontal ou vertical,[m]

Obs.:

1- Como trata-se de um forno de pequenas dimensões, o coeficiente  $h_1$  será considerado desprezível ( $\Delta T$  tende a zero), visto que a temperatura no interior do forno será quase a mesma que a temperatura na superfície interna, de modo que a variação de temperatura entre os dois pontos tenderá a zero, o mesmo ocorrendo com  $h_1$ .

2- Baseado em valores obtidos em catálogos de isolantes térmicos, que fornecem a temperatura da face fria de acordo com a temperatura da face quente e a espessura do material; baseado também nas noções de tamanho que o forno deverá ter, optou-se por uma espessura de teto e paredes de 100 mm e uma espessura de soleira de 25 mm. Utilizando-se as equações (2), (3), (4) e (5), obten-se os valores dos coeficientes de transferência de calor para cada superfície do forno:

$$h_{2Teto} = 0,61 \left( \frac{\Delta T}{L^2} \right)^{\frac{1}{5}}$$

$$\Delta T = 137 - 25 = 112 \text{ } ^\circ C$$

$$h_{2Teto} = 0,61 \left( \frac{112}{0,400^2} \right)^{\frac{1}{5}} = 2,261 \text{ W / m}^2 \text{ } ^\circ C$$

$$h_{2parede\ 1} = 1,42 \left( \frac{112}{0,400} \right)^{\frac{1}{4}} = 5,809 \text{ W / m}^2 \text{ } ^\circ C$$

$$h_{2parede\ 2} = 1,42 \left( \frac{112}{0,350} \right)^{\frac{1}{4}} = 6,006 \text{ W / m}^2 \text{ } ^\circ C$$

$$h_{2 \text{ soleira}} = 1,32 \left( \frac{234 - 25}{0,400} \right)^{\frac{1}{4}} = 6,311 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Uma vez de posse dos valores de h para cada superfície do forno, utilizou-se a equação (2) para se determinar a perda de calor para cada uma delas:

Perda pelo teto:

$$q_T = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_{2T} A} + \frac{\Delta x}{KA}}$$

$$q_T = \frac{975}{\frac{1}{2,261 \times 0,140} + \frac{0,100}{0,260 \times 0,140}} = 165,085 \text{ W}$$

Perda pelas paredes:

$$q_{p1} = \frac{975}{\frac{1}{5,809 \times 0,100} + \frac{0,100}{0,260 \times 0,100}} = 175,117 \text{ W}$$

$$q_{p2} = \frac{975}{\frac{1}{6,006 \times 0,088} + \frac{0,100}{0,260 \times 0,088}} = 155,683 \text{ W}$$

Perda pela soleira:

$$q_s = \frac{975}{\frac{1}{6,311 \times 0,140} + \frac{0,025}{0,260 \times 0,140}} = 536,118 \text{ W}$$

As perdas pelos apoios de cerâmica da placa de teste se darão por condução, sendo calculadas da seguinte maneira:

$$q_{CER} = \frac{-KA}{\Delta X} (T_2 - T_1) \quad (6)$$

onde:

K= Coeficiente de transferência de calor por condução [W/mK].

A= Área de troca de calor [m<sup>2</sup>].

ΔX= espessura dos apoios [m].

T1, T2= Temperaturas no interior e exterior do forno, respectivamente.

Como os apoios serão em número de 4, o valor encontrado para a perda de calor pelos apoios de cerâmica deve ser multiplicado por 4.

K = 25 W/mK (dado fornecido pelo fabricante- Sandvick do Brasil S.A.)

$$A = \frac{bh}{2} = \frac{0,016 \times 0,014}{2} = 1,12 \times 10^{-4} m^2$$

Obs.: formato triangular  
espessura = 25 mm

$$q_{CER} = \frac{-25 \times 1,12 \times 10^{-4} \times (1000 - 25) \times 4}{0,025} = 436,800 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \text{Perda total (Q)} &= q_T + 2q_{P1} + 2q_{P2} + q_S + q_{CER} = \\ 165,085 + 2(175,117) + 2(155,683) + 536,118 + 436,800 &= 1799,603 \text{ W} \\ \text{PORTANTO, } Q &= 1,8 \text{ KW} \end{aligned}$$

Considerando-se que:

- ✓ A soleira terá aberturas para a passagem dos termopares e corpo de prova;
- ✓ Será necessário potência adicional para aquecer a peça a ser tratada;
- ✓ A união entre as paredes e a soleira não será perfeita;
- ✓ Vários autores recomendam a adoção de coeficientes de segurança;
- ✓ Todo equipamento elétrico apresenta perdas na condução de eletricidade;

Conclui-se que a potência do forno para suprir as perdas e alcançar a temperatura desejada deverá ser 100% maior que a calculada, ou seja:

$P = 3,6 \text{ KW}$

Uma vez obtido um valor numérico para a potência que o forno deve ter para alcançar a temperatura desejada suprimindo todas as perdas, pode-se

dimensionar a resistência. Para isto, é necessário determinar o valor de corrente elétrica que a resistência deve suportar para alcançar a potência desejada:

$$I = \frac{W}{V} \quad (7)$$

onde:

W= Potência do forno (já calculada)

V= Tensão da rede (220 V)

Desta maneira, utilizando-se a equação (7), obtém-se o valor da corrente:

$$I = \frac{3600}{220}$$
$$I = 16,36A$$

O diâmetro do fio da resistência é obtido por meio da seguinte equação [39]:

$$d = 0,3443 \sqrt{\frac{P}{P_s} \left( \frac{P}{pV} \right)^2} \quad (8)$$

onde:

d= Diâmetro do fio [mm]

$\rho$ = Resistividade do elemento [ $\Omega/\text{cm}$ ]

p= Número de circuitos em paralelo

V= Tensão da rede elétrica [volts]

$P_s$ = Potência específica [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]

P= Potência do forno [W]



Utilizando-se a equação (8), obtém-se o valor para o diâmetro do fio da resistência:

$$d = 0,3443 \sqrt{\frac{1,45}{3,5} \left( \frac{3600}{1 \times 220} \right)^2}$$

$$d = 1,653 \text{ mm}$$

O diâmetro comercial mais próximo é o de 1,7 mm, sendo, portanto, adotado.

O comprimento do fio é dado pela seguinte equação [39]:

$$L = \frac{P}{10 \times \pi \times d \times P_s} \quad (9)$$

onde:

L= Comprimento linear do fio da resistência [m].

P= Potência do forno [W].

d= Diâmetro do fio da resistência [mm].

Ps= Potência específica [W/cm<sup>2</sup>]

Sendo assim, o valor encontrado para o comprimento do fio, aplicando-se a equação (9) é de:

$$L = \frac{3600}{10 \times \pi \times 1,7 \times 3,5}$$

$$L = 19,26 \text{ m}$$

Uma outra maneira de se efetuar os cálculos de diâmetro e comprimento da resistência é sugerido pelo manual de resistências Sandvick [33], conforme mostrado a seguir:

$$d = 0,3433 \sqrt{\left( \frac{N}{V} \right)^2 \frac{l_T}{n}} \quad (10)$$

onde:

N= Potência do forno [W]

V= Tensão da rede [V]

$l_T$ = Resistividade à temperatura de trabalho [ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ](à 1000 °C,  $l_T$ )  
=1,45x1,02)

n= Carga superficial máxima [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ]

Portanto, aplicando-se a equação (10), encontrou-se o seguinte valor:

$$d = 0,343 \sqrt{\left(\frac{3600}{220}\right)^2 \frac{1,45 \times 1,02}{4}}$$
$$d = 1,59 \text{ mm}^2$$

Como o diâmetro do fio é bastante próximo de 1,7 mm, este será o valor utilizado para o cálculo do comprimento do fio:

$$l = 0,785 \frac{V^2 d^2}{N l_T}$$
$$l = 0,785 \frac{220^2 \times 1,7^2}{3600 \times 1,45 \times 1,02}$$
$$l = 20,62 \text{ m}$$
(11)

Como pode-se ver pelas duas formas de cálculo, os valores obtidos são bastante próximos.

### 3.1.2- CONSTRUÇÃO DO FORNO

De posse dos dados de projeto do forno, passou-se à construção propriamente dita. Em primeiro lugar tratou-se da aquisição dos materiais:

- A placa Duraboard 1200 foi adquirida na forma de painéis rígidos na medida de 610x1220x25 mm, na quantidade de 3 painéis, quantidade mínima a que o fornecedor se dispunha a vender.

- A resistência Kanthal A-1 foi adquirida na forma de fio na quantidade de aproximadamente 70 metros de fio, de modo a permitir substituição em caso de queima.
- Para se construir a estrutura do forno utilizou-se cantoneiras de aço carbono, com seção transversal medindo 20x20x3 mm, e chapas de aço carbono de 2 mm de espessura.
- Para a fixação dos painéis isolantes foram utilizados parafusos de aço inox na primeira camada, onde a temperatura será mais alta, e de aço carbono nas camadas seguintes, onde a temperatura assim o permitia.

As dimensões do forno, assim como as de toda a estrutura, foram baseadas nas dimensões do conjunto placa de teste+ implante. Como dentro do forno este medirá 100x120 mm, o forno deve ter dimensões tais que ao mesmo tempo em que deve ser grande o suficiente para envolver completamente a placa deve também ser pequeno o suficiente para que a transmissão de calor seja a mais eficiente possível. Todos estes fatores levaram a se determinar que o forno tenha as dimensões de 415x260x370 mm (externas) e 185x140x148 mm (internas). Com base nestas medidas, construiu-se uma armação com cantoneiras metálicas, com o objetivo de dar rigidez ao forno. As cantoneiras foram serradas nas pontas, de maneira a proporcionarem um bom encaixe, e foram então soldadas na posição. A figura 3.2 mostra um esquema da montagem da armação metálica.

Em seguida as placas de isolamento térmico foram montadas. O fato delas serem apresentadas na forma de placas rígidas facilitou grandemente o trabalho de montagem do forno. As placas foram serradas manualmente e fixadas por parafusos duas a duas, alternadamente, de modo a minimizar a perda de calor. Após o corte e uma primeira montagem das placas de isolamento, estas foram retiradas para a soldagem das chapas de aço externamente ao forno. Após a soldagem das chapas, efetuou-se a montagem definitiva do forno.

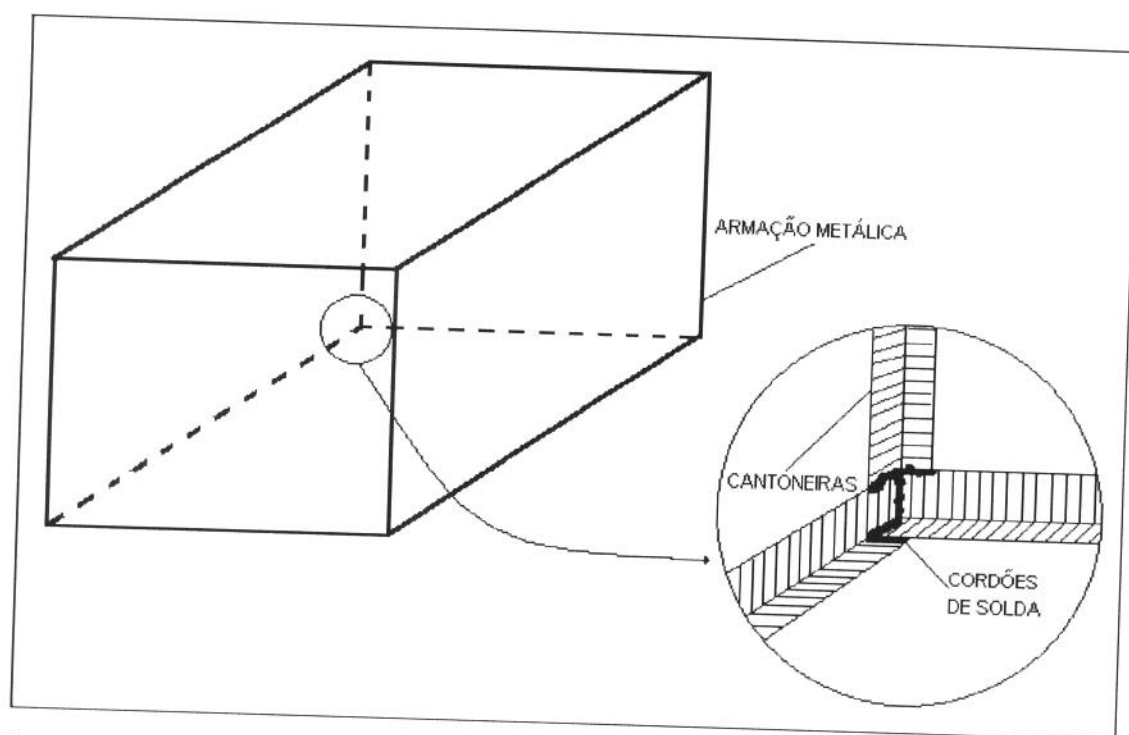


Figura 3.2- Esquema da armação metálica do forno.

As resistências foram enroladas em formato helicoidal num torno universal da seguinte maneira: determinou-se o diâmetro mais conveniente para a hélice, de modo que a resistência enrolada não tivesse um diâmetro excessivo, o que inviabilizaria sua montagem no forno, e nem um diâmetro muito pequeno, o que faria com que o comprimento da hélice fosse muito grande, o que também inviabilizaria a sua montagem no forno. Neste trabalho optou-se por um diâmetro interno de 13 mm, que se mostrou conveniente para as dimensões do forno. No torno prendeu-se uma barra circular com diâmetro de 13 mm na placa giratória, juntamente com uma das pontas da resistência, enquanto que no porta-ferramentas prendeu-se uma barra chata com um orifício circular de diâmetro 2 mm, para a passagem do fio. Fixou-se no torno os parâmetros necessários para que a usinagem de uma rosca (passo, velocidade, velocidade do porta-ferramentas, etc.) de passo 3,5 mm (que é aproximadamente o dobro do diâmetro do fio da resistência), e ligou-se o automático, de modo que a barra circular fosse girando e o fio se enrolasse nela. Cada vez que se chegava ao fim do barramento parava-se a máquina e colocava-se a parte do fio já enrolado dentro da árvore do torno, tornando depois a prender a barra e a resistência na castanha e ligando novamente a

máquina. Repetiu-se este processo até que todo o fio estivesse enrolado, obtendo assim uma "mola" de comprimento tal que fosse possível fixá-la dentro do forno, circundando a placa de teste para uma troca de calor eficaz.

A fixação da resistência na parte interna do forno foi concebida primeiramente da forma mais tradicional, dentro de placas de Alumina perfuradas e fixadas nas paredes do forno. Este método, porém, tem alguns inconvenientes, pois não permite uma quantidade muito grande de resistência além de aumentar em muito o peso total do forno. Outro inconveniente, menos comum, é a condução de corrente elétrica pela Alumina, devido à eventual presença de Ferro na sua composição. Isto traria como consequência uma série de curtos-circuitos no forno, podendo causar queima de resistência e até riscos aos operadores. Uma segunda idéia foi a de fixar o fio não enrolado nas próprias paredes do forno, em forma de ziguezague, com grampos feitos do próprio material da resistência, porém também esta idéia apresentou inconvenientes, sendo que o principal deles foi a falta de consistência do material isolante, que não conseguia reter os grampos adequadamente. A solução encontrada foi entalhar nichos inclinados no próprio material isolante de modo que a resistência enrolada se acomodasse por pressão e gravidade. É importante citar que no corte e no entalhe das placas isolantes foram tomados todos os cuidados com a segurança, tais como o uso de luvas, máscara e guarda-pó com mangas compridas, de modo a se evitar o contato com a pele e a inalação do pó resultante, que é potencialmente perigoso para a saúde. Outro aspecto interessante foi o fato de se comprar a resistência em forma de fios, o que permitiu que ela fosse enrolada no diâmetro mais conveniente, tanto para a colocação nos nichos das paredes do forno quanto para a acomodação do comprimento total de fio exigido dentro do forno para que este desenvolvesse a potência necessária. A figura 3.3 mostra um esquema do forno já montado, com os entalhes nas paredes e a resistência colocada:

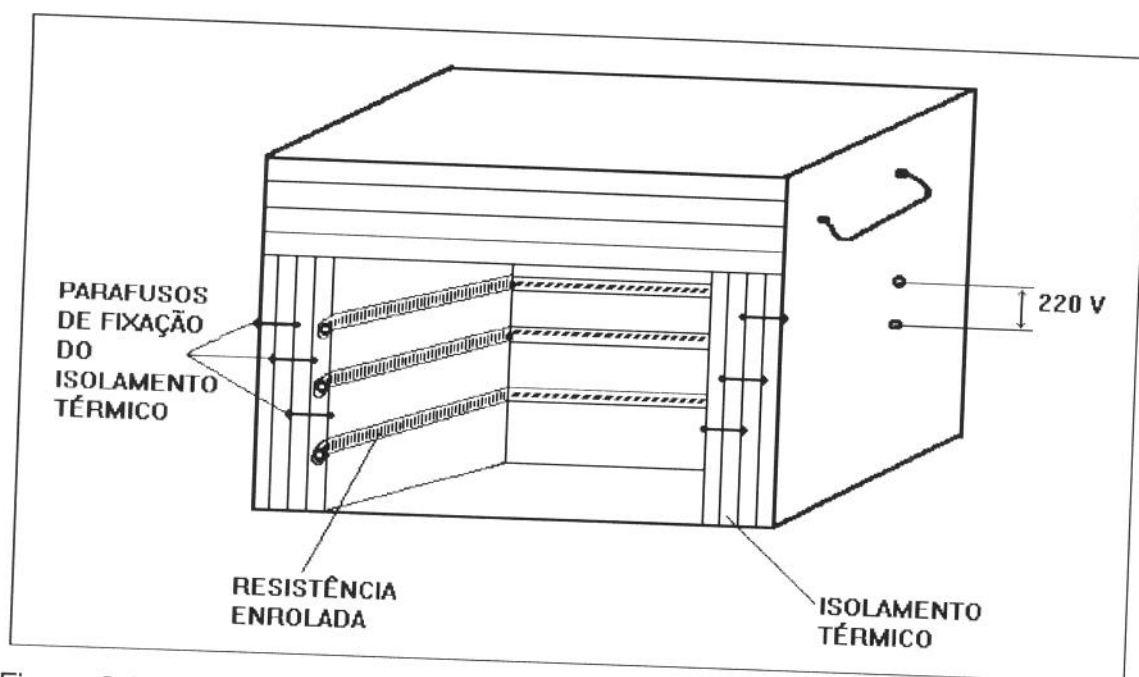


Figura 3.3- Esquema final do forno.

Para o controle de temperatura, após consultas ao mercado, optou-se por um controlador de temperatura programável microprocessado do tipo rampa e patamar acoplado a um módulo de potência tipo trem de impulsos. Este tipo de controlador tem uma boa precisão no controle de temperatura, pois trabalha com ajuste PID (Proporcional, Integral e Derivativo), o que faz com que a corrente elétrica liberada pelo módulo de potência para o forno seja a medida exata para que o forno atinja a temperatura desejada, ao contrário dos antigos controladores do tipo liga-desliga, que quando desligados não permitem a passagem de corrente e quando ligados liberam 100% da corrente para o forno, de maneira que o ajuste de temperatura se dá aos saltos. O controlador ainda permite grandes variações de programação, permitindo uma grande flexibilidade em relação às velocidades de aquecimento e resfriamento, ou seja, as rampas, e à temperatura de ensaio, ou seja, o patamar. Esta programação pode ser feita via microcomputador, porém isto apenas seria justificável no caso de existir um número elevado de controladores. Como não é este o caso, optou-se pela programação manual.

### 3.2-O SISTEMA DE TRAÇÃO

O primeiro passo em um projeto ou dimensionamento de estruturas sujeitas a esforços é a quantificação destes esforços ou seja, a determinação exata, em valores numéricos, da carga a que a estrutura estará submetida. No caso do teste de implante modificado todo o esforço estará em função do material e da seção transversal do corpo de prova, visto que ele é que será submetido a um ensaio de tração e não seria interessante que a estrutura tivesse uma resistência menor do que o corpo de prova. Como o material a ser testado poderá variar seria conveniente dimensionar a estrutura de modo a que ela suporte o maior esforço possível, acrescido ainda de um razoável coeficiente de segurança.

#### 3.2.1- O CORPO DE PROVA E A PLACA DE TESTE

Como já foi dito, o teste de implante modificado ainda não é normalizado, existindo então uma tendência a se seguir os procedimentos descritos para o teste de implante, que já é normalizado em vários países [35]. Neste trabalho, procurou-se, além de se basear nas normas para o teste de implante, seguir, tanto quanto possível os procedimentos descritos por Tamaki e Suzuki [40], que são pioneiros na utilização do teste de implante modificado. Portanto optou-se por um corpo de prova com as seguintes dimensões:

Comprimento: 90 mm

Diâmetro: 6 mm

Formato do entalhe: helicoidal em "V", ângulo de 40°, passo de 1 mm

Profundidade do entalhe: 0,5 mm

Raio da ponta do entalhe: 0,1 mm

Comprimento da região entalhada: 15 mm

Pelos mesmos motivos a placa de teste foi projetada com as seguintes dimensões: comprimento: 120 mm; largura: 100 mm e espessura de, no mínimo 20 mm.

A figura 3.4 mostra um esquema do corpo de prova utilizado neste trabalho:

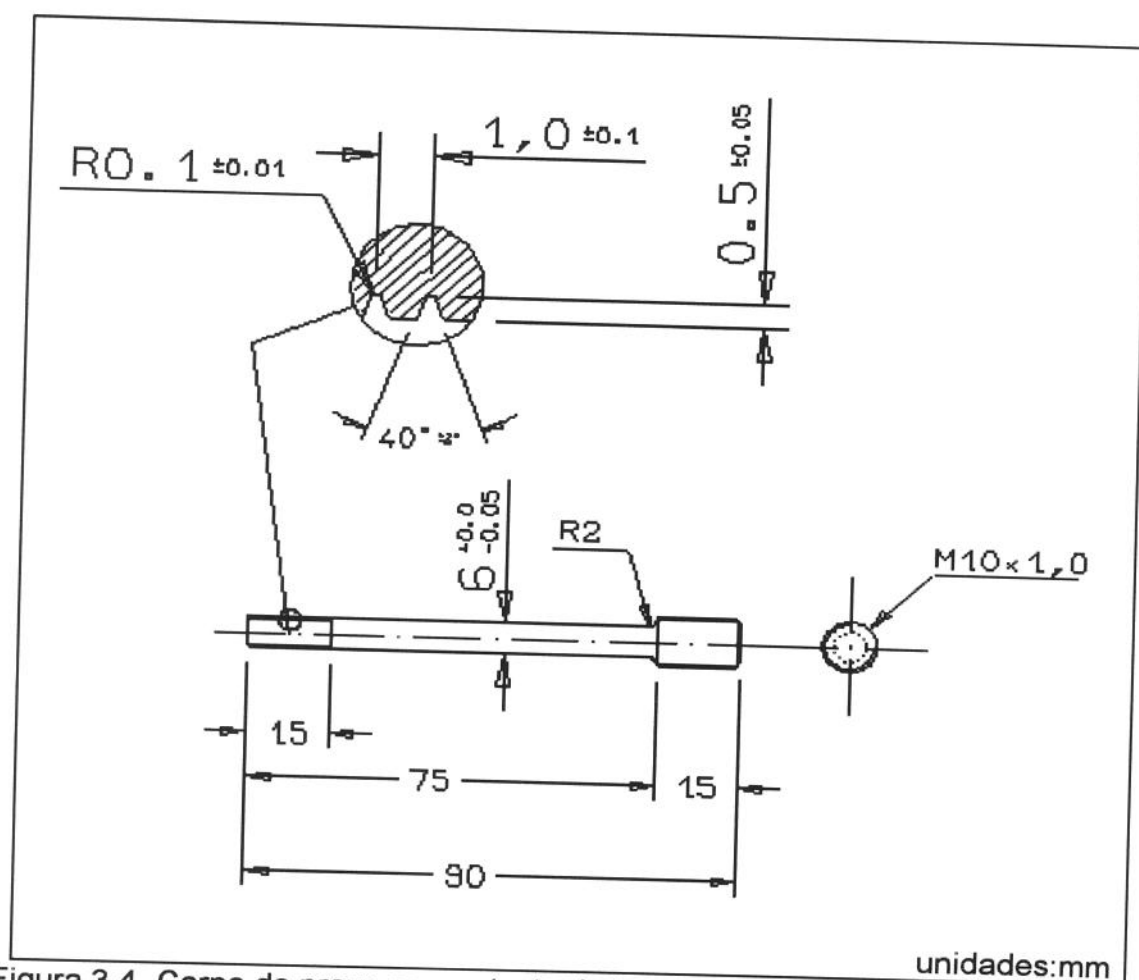


Figura 3.4- Corpo de prova para o teste de implante modificado

Como já foi citado anteriormente, o corpo de prova deve obedecer uma geometria precisa, com tolerâncias bastante, conforme pode ser visto na figura 3.4, de modo a não comprometer a repetibilidade dos ensaios e a confiabilidade dos dados colhidos. O mesmo não ocorre com a placa de teste no que se refere à tolerância de suas medidas, porém deve-se cuidar que o ajuste entre o corpo de prova e o furo da placa de teste tenha uma tolerância mínima, de  $\pm 0,1$  mm, de modo a garantir que a posição do corpo de prova em relação à solicitação de tração não sofra alterações entre os ensaios. A figura 3.5 mostra um esquema da placa de teste utilizada neste trabalho:



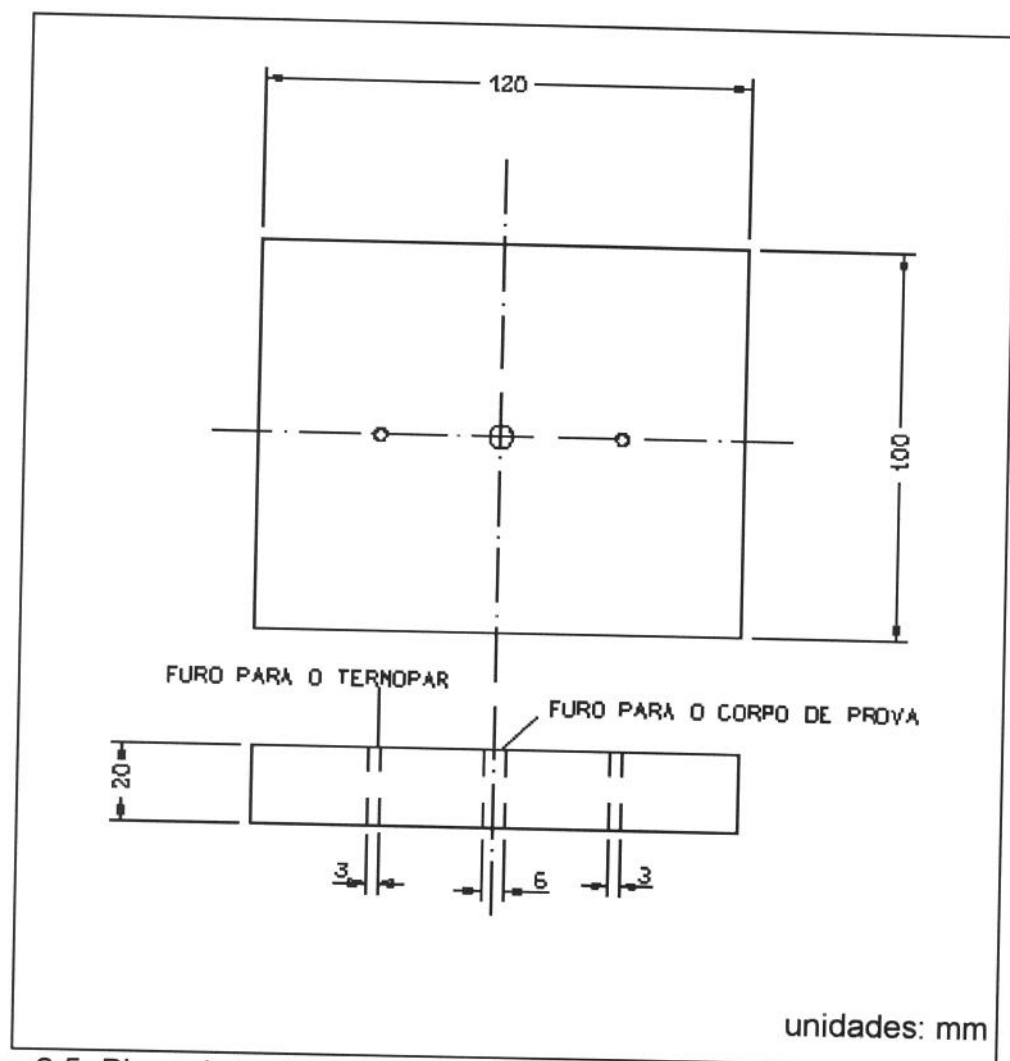


Figura 3.5- Placa de teste para o teste de implante modificado

### 3.2.2- CARGAS ATUANTES NO SISTEMA:

Limite de escoamento dos materiais a serem testados:

SAR 80 T: 784 N/mm<sup>2</sup> (80 Kgf/mm<sup>2</sup>)

ABNT 1045: 625 N/mm<sup>2</sup> (63,8 Kgf/mm<sup>2</sup>)

Área da seção transversal do corpo de prova na região de menor área:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 5,5^2}{4} = 23,76 \text{ mm}^2 \quad (12)$$

Tensão que deve ser aplicada ao corpo de prova para que ocorra o escoamento:

$$\sigma = 80 \text{ Kgf/mm}^2 \times 23,76 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = 1900,66 \text{ Kgf}$$

Como será necessário que a estrutura suporte uma solicitação maior que a solicitação de escoamento do corpo de prova, e como o material do corpo de prova pode ser variado, com possível aumento no limite de resistência, o valor de solicitação adotado para o dimensionamento dos componentes do sistema de tração será de:

4000 Kgf

### 3.2.3- PROJETO E DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE TRAÇÃO

Num projeto de um equipamento é normal que um cálculo seja feito e refeito várias vezes, até que se encontre um valor para uma determinada grandeza que seja considerado aceitável. Neste projeto buscou-se dimensionar os componentes sujeitos à esforços mecânicos do modo a se ter uma deformação mínima, com a solicitação situada dentro do limite elástico do material. Contudo, com o objetivo de tornar este trabalho menos cansativo para o leitor, apresentou-se aqui apenas os cálculos finais de dimensionamento, com as dimensões finais dos elementos (largura, altura e comprimento). A figura 3.6 mostra um esquema fora de escala do sistema de tração projetado neste trabalho.

A tração se dá pela aplicação de carga pelo cilindro hidráulico, ficando restrita entre a barra inferior e a alavanca, como pode ser visto na figura 3.6. Com o alívio da pressão do cilindro hidráulico, a tração é gradualmente aplicada sobre o corpo de prova.

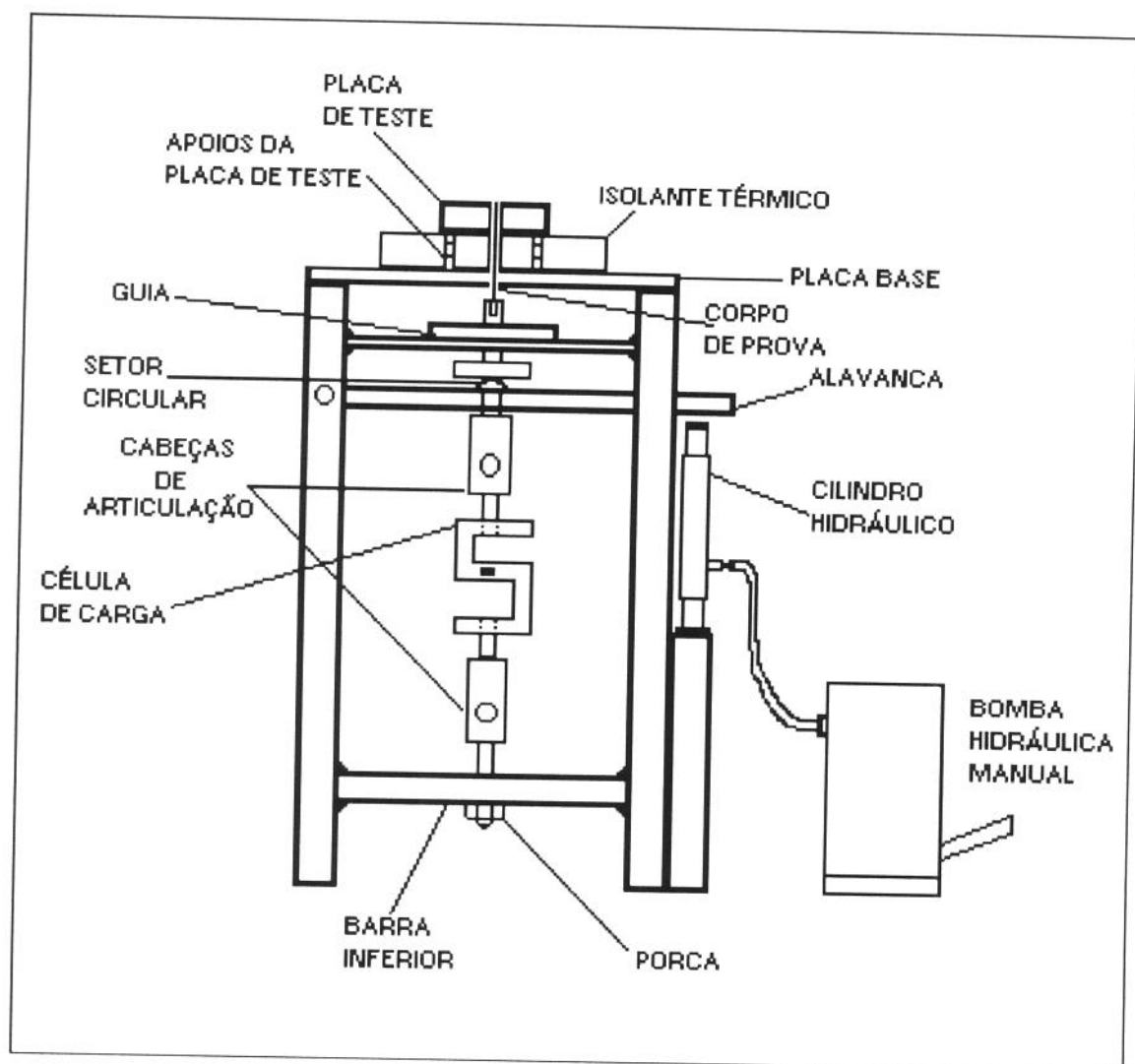


Figura 3.6- Esquema do sistema de tração

A seguir será feito o dimensionamento dos elementos do sistema de tração considerados críticos, seja pelo tipo de solicitação, seja pelo nível da carga imposta.

#### a) BRAÇOS DE ALAVANCA

A alavanca tem a função de impor uma solicitação de tração ao sistema, que num primeiro momento deve ficar restrita entre a barra inferior e a própria alavanca. A carga atuante será considerada concentrada e as dimensões do perfil são as especificadas na figura 3.7:

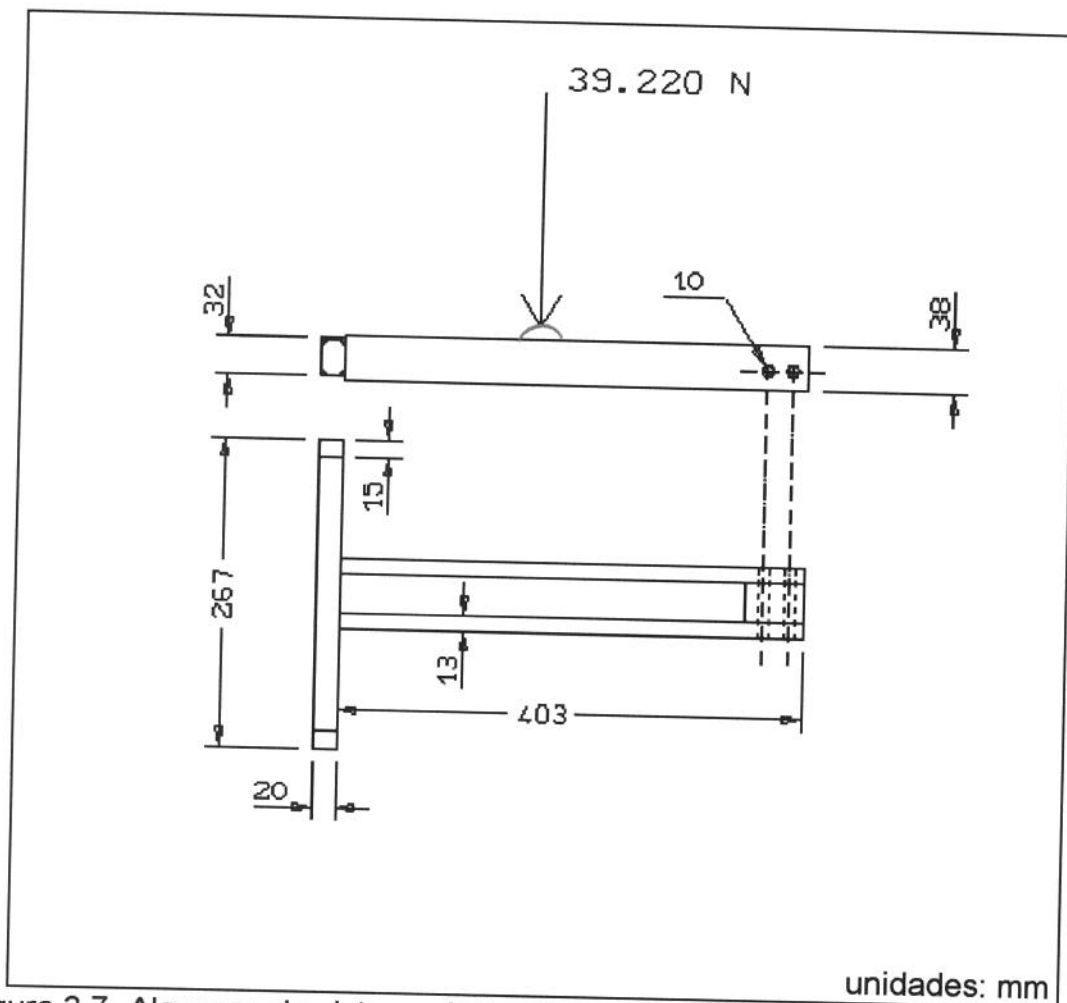


Figura 3.7- Alavanca do sistema de tração

Cálculo da deflexão: Viga bi-apoiada com carga concentrada intermediária:  
flecha máxima[36]:

$$y_{AB} = \frac{Fbx}{6EI} (x^2 + b^2 - l^2) \quad (13)$$

$$y_{BC} = \frac{Fa(l-x)}{6EI} (x^2 + a^2 - 2lx) \quad (14)$$

onde:

y= deformação devido à flexão entre dois pontos [mm]

A,C= pontos de apoio da alavanca

B= ponto de aplicação da força (intermediário a A e B)

a= distância entre os pontos A e B [cm]\*

b= distância entre os pontos B e C [cm]\*

x= distância, a partir do ponto A, onde se deseja calcular a flecha [cm]\*

l= comprimento total da alavanca [cm]\*

E= módulo de elasticidade do material [GPa]\*

I= momento de inércia do perfil [mm<sup>4</sup>]

F= força aplicada à alavanca [N]

Obs: Para se obter o resultado da operação em mm, é necessário que os dados assinalados tenham o formato indicado acima.

Cálculo do momento de inércia [36]:

perfil retangular:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (15)$$

onde:

b= base do perfil [mm]

h= altura do perfil [mm]

$$I = \frac{13 \times 38^3}{12}$$
$$I = 59.444,67 \text{ mm}^4$$

Como a alavanca terá dois braços, o valor do momento de inércia deverá ser multiplicado por 2.

Cálculo da força:

$$F = 4000 \times 9,8 = 39.200 \text{ N}$$

O valor do módulo de elasticidade do material é conhecido e tabelado, sendo fixado em 207 GPa [36]. A deformação é obtida pela aplicação da equação (13):

$$y_{AB} = \frac{39.200 \times 17 \times 23}{6 \times 207 \times 2 \times 59.444,67 \times 40} (17^2 + 23^2 - 40^2)$$
$$y_{AB} = -2,03 \text{ mm}$$

### B) Barra Inferior

A barra inferior é que, juntamente com a alavanca, suportará o maior esforço. A carga será concentrada e suas dimensões serão as que se vê na figura 3.8:

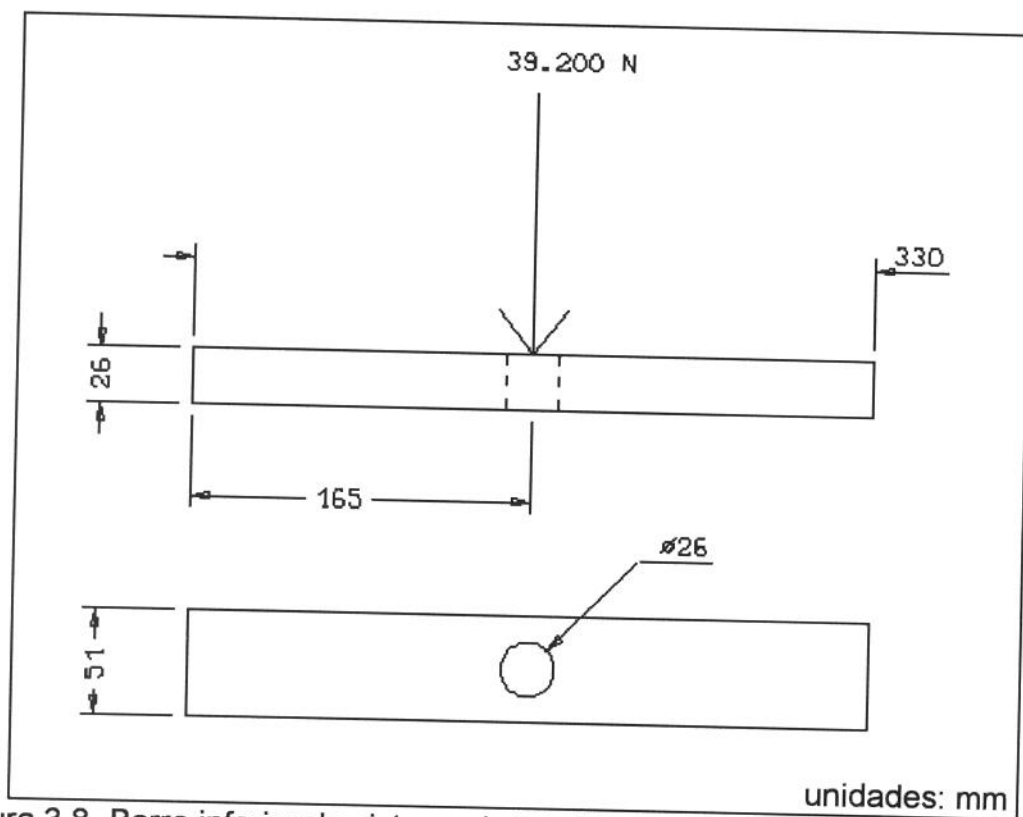


Figura 3.8- Barra inferior do sistema de tração.

Como se pode ver na figura 3.8, a barra terá um furo por onde o eixo central do equipamento possa ser fixado. As extremidades serão fixadas nas pernas do equipamento, como pode ser visto na figura 3.6.

A deformação máxima da barra é dada por [36]:

$$y_{MAX} = -\frac{Fl^3}{48EI} \quad (16)$$

O momento de inércia do perfil é dado pela equação (15):

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{51 \times 26^3}{12} = 74.698 \text{mm}^4$$

Portanto, pela aplicação da fórmula (16), a deformação da barra será de:

$$y_{MAX} = -\frac{39200 \times 33^3}{48 \times 207 \times 74.698} = 1,9 \text{mm}$$

Obs.: A deformação da barra foi calculada como se não existisse nenhuma descontinuidade na barra, o que não é verdade, pois nela existe um furo. Mais tarde, no próximo capítulo, serão vistos os efeitos do furo na resistência da barra e como foi contornado este problema.

C) Apoio dos braços de alavanca[36].

Utilizando-se a equação (15), obtém-se o valor do momento de inércia:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{20 \times 32^3}{12} = 54.613,33 \text{mm}^4$$

A deformação máxima, para uma viga bi-apoiada com duas forças iguais e igualmente espaçadas, é calculada pela equação a seguir:

$$y_{MAX} = \frac{Fa}{24EI} (4a^2 - 3l^2) \quad (17)$$

onde:

a= distância do ponto de aplicação de uma das forças à extremidade mais próxima. A deformação, pela aplicação da equação (17), será de:

$$y_{MAX} = \frac{39200 \times 10}{24 \times 207 \times 54.613,33} (4 \times 10^2 - 3 \times 26^2)$$

$$y_{MAX} = -2,35 \text{mm}$$

Os elementos estruturais dimensionados acima são aqueles considerados críticos, pois são os que suportam maior solicitação. Sendo assim, os demais elementos da estrutura não necessitarão de dimensionamento.

Uma vez de posse dos cálculos de dimensionamento dos elementos estruturais do sistema de tração, pode-se então passar à construção propriamente dita. Antes, porém, é necessário chamar a atenção para três detalhes importantes da estrutura (vide figura 3.6)

O primeiro é a utilização de uma guia que tem como função fazer com que a solicitação aplicada no corpo de prova seja totalmente uniaxial, ou seja, atue em uma única direção, que no caso é a vertical. O uso desta guia baseia-se no axioma da geometria segundo o qual "o lugar geométrico de uma reta é dois pontos". Neste caso, a guia faz com que a peça na qual o corpo de prova está rosqueado movimente-se segundo uma linha reta, de maneira que o esforço sobre o corpo de prova não tenha nenhum outro componente além do vertical.

O segundo ponto é a utilização de um perfil circular sobre os braços da alavanca, de modo que o contato entre o braço da alavanca e a peça onde está rosqueado o corpo de prova seja o menor possível, de modo a evitar qualquer variação no sentido de aplicação da força. A figura 3.9 mostra um esquema da guia e do perfil circular.

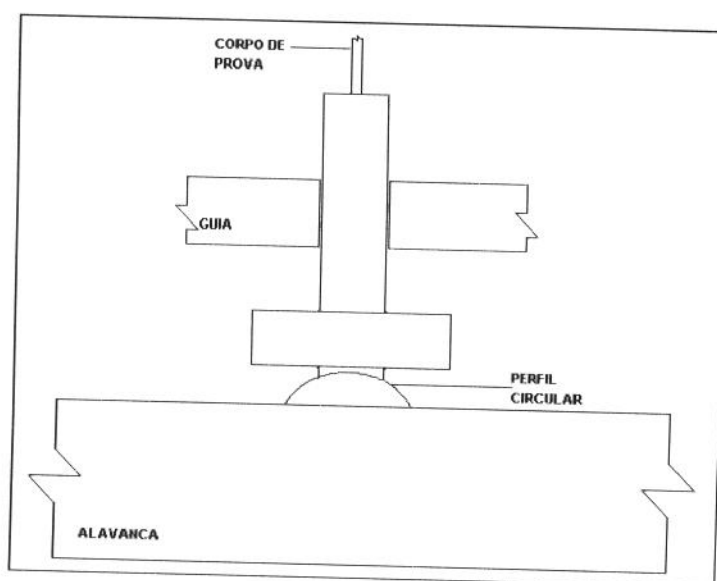


Figura 3.9- Esquema de utilização da guia e do perfil circular.



O terceiro ponto é a utilização de cabeças articuladas no engate entre a célula de carga e o sistema de tração. Isto evita que um eventual torque aplicado no sistema seja transmitido à célula e ao corpo de prova.

### 3.2.2- CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA DE TRAÇÃO

O material utilizado foi o ABNT 1020 trefilado, devido ao seu baixo custo, boa soldabilidade, usinabilidade e propriedades mecânicas. Sempre se buscou adquirir os materiais em dimensões maiores que as especificadas, de modo a se ter uma tolerância para eventuais perdas ou retrabalhos de peças. Apesar desta concepção eventualmente acarretar em um maior trabalho para a construção do equipamento, acredita-se que os benefícios advindos daí superem os eventuais prejuízos com tempo e material.

Após a aquisição dos materiais, passou-se à montagem propriamente dita. Neste processo o principal método de fixação utilizado foi a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, porém utilizou-se também em menor escala a fixação por parafusos.

As pernas da estrutura (vide figura 3.6), feitas de perfil tubular quadrado de 2 polegadas (aproximadamente 51 mm) com 3 mm de parede, foram cortadas e adaptadas para a fixação na placa base. Esta adaptação consistiu do fechamento, por soldagem, de um dos lados do perfil por uma chapa de aço medindo 51x51x5mm, previamente furada no centro e rosqueada por macho para a passagem de um parafuso. Em seguida a placa base foi cortada por maçarico para chegar às dimensões da base do forno, e em seguida esmerilhada e furada nos 4 cantos. Os furos foram então rebaixados de modo a se inserir 4 parafusos do tipo Allen sem se observar ressaltos na parte superior da chapa, onde o forno deveria se encaixar.

Após a fixação das 4 pernas à chapa foram soldadas as várias barras da estrutura: a guia e suas barras de apoio, a barra inferior e suas barras de apoio e os apoios da alavanca. Excetuando-se a guia e suas barras de apoio, todos os outros elementos estariam altamente solicitados, razão pela qual receberam um cuidado especial na soldagem: primeiramente foi feito um passe de raiz com eletrodo celulósico E-6010 de 2,5 mm de diâmetro, seguido de um

passa de cobertura com eletrodo rutilico E-6013 de mesmo diametro, com corrente na faixa de 100 a 150 A. Posteriormente, com a soldagem destas varias barras no perfil tubular verificou-se uma distorção dimensional no comprimento dos perfis, que foi então corrigida com a adaptação de parafusos nas extremidades inferiores dos perfis utilizando o mesmo método usado nas extremidades superiores: a soldagem de chapas fechando o perfil, previamente furadas e rosqueadas para a passagem dos parafusos.

A guia foi soldada antes de ser furada, de modo a se evitar a distorção dimensional promovida pela soldagem. Em seguida a estrutura toda foi fixada numa furadeira de coluna onde, por meio de furações sucessivas, chegou-se à dimensão desejada para o furo.

As peças do eixo central do equipamento, destinadas a transmitir a tração conectadas à célula de carga foram usinadas a partir de tarugos redondos de aço carbono ABNT 1020 trefilado e estão ilustradas nas figuras 3.10, 3.11 e 3.12.

A usinagem destas peças foi feita utilizando-se um torno, uma fresa, uma plaina e uma furadeira de coluna. Os furos das peças das figuras 3.10 e 3.11, assim como a peça da figura 3.12 foram usinados com tolerância H7/h7, determinada pelos fabricantes da célula de carga. Nas outras dimensões não houve grande preocupação com tolerâncias, devido não existir a necessidade de ajustes. Após a montagem procedeu-se o lixamento e pintura da estrutura com revestimento anti-ferrugem.

### 3.3- SISTEMA DE MONITORAMENTO

O sistema de monitoramento é um aparato eletro-eletrônico que tem por função monitorar em tempo real o esforço de tração sobre o corpo de prova, assim como a temperatura da ZAC do corpo de prova durante o ensaio. Para tanto, o sistema é composto por dois subsistemas, o sistema de monitoramento da tração e o sistema de monitoramento do tratamento térmico. Estes subsistemas geram sinais que são centralizados por uma interface analógico/digital e processados em um microcomputador.

de ajustes. Após a montagem procedeu-se o lixamento e pintura da estrutura com revestimento anti-ferrugem.

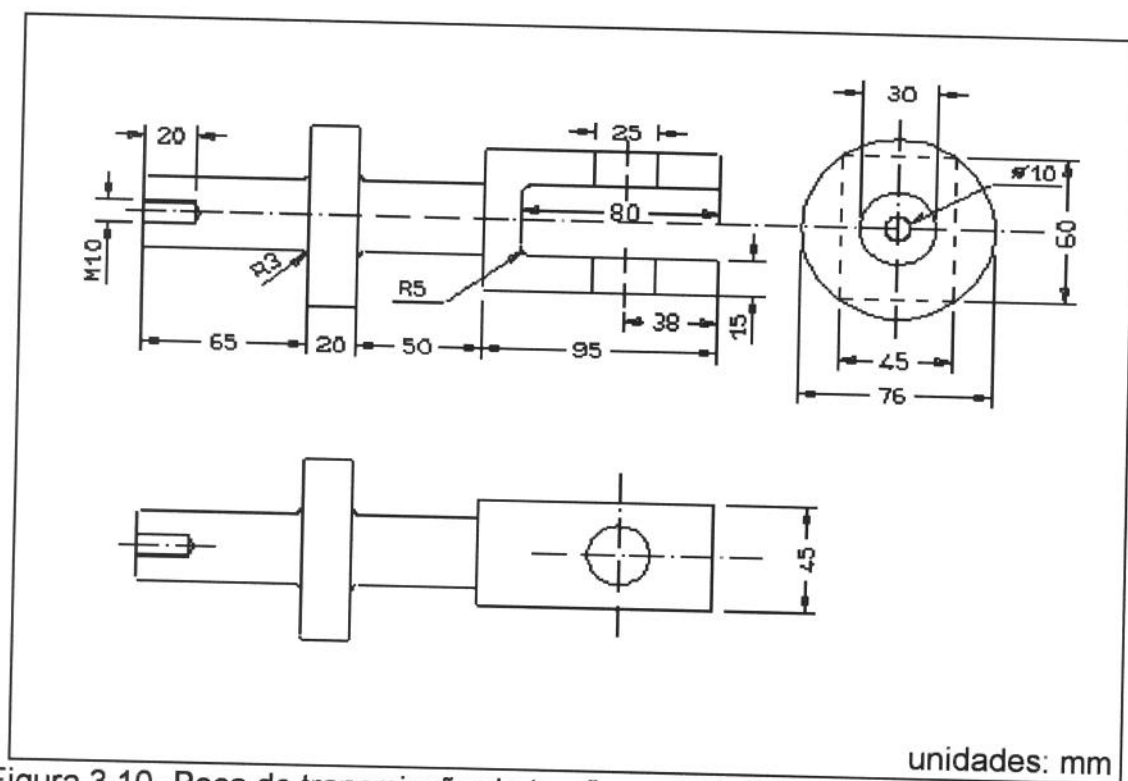


Figura 3.10- Peça de transmissão de tração conectada por um lado à célula de carga e por outro lado ao corpo de prova.

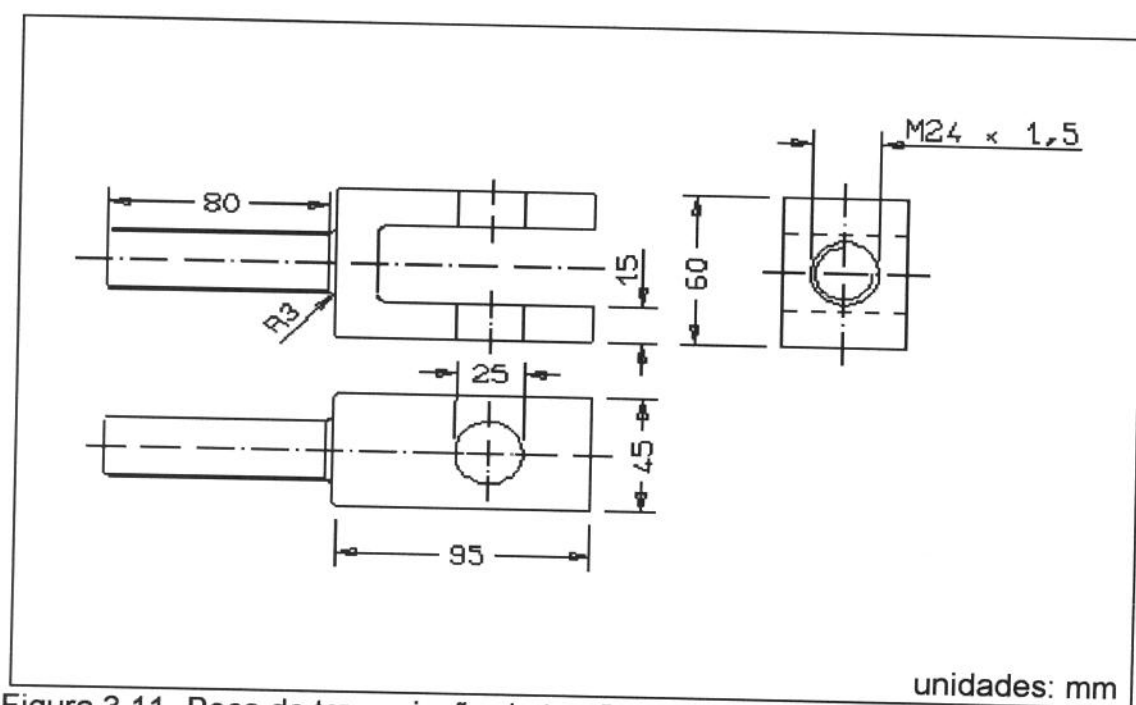


Figura 3.11- Peça de transmissão de tração conectada por um lado à célula de carga e por outro à barra inferior.

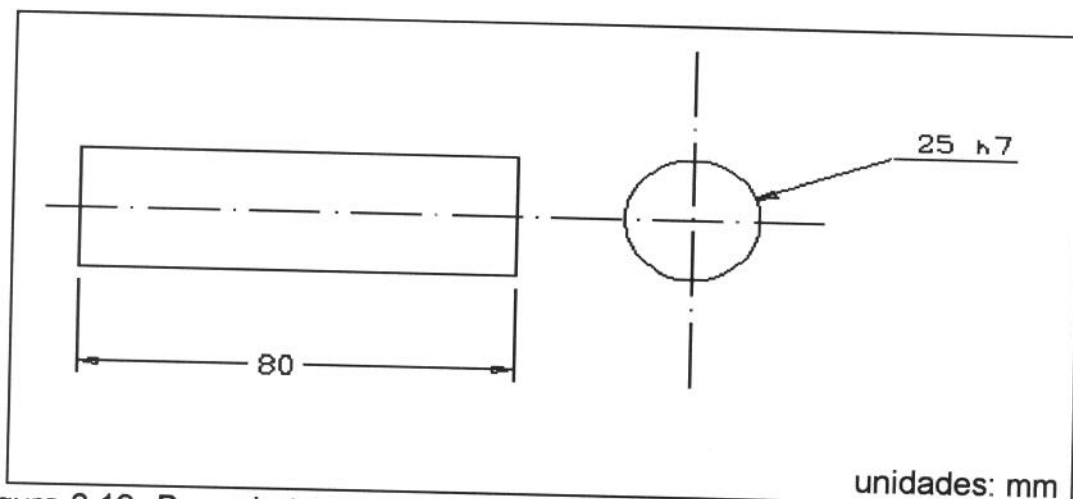


Figura 3.12- Peça de transmissão de tração que conecta a célula de carga às duas peças anteriores (duas unidades).

### 3.3- SISTEMA DE MONITORAMENTO

O sistema de monitoramento é um aparato eletro-eletrônico que tem por função monitorar em tempo real o esforço de tração sobre o corpo de prova, assim como a temperatura da ZAC do corpo de prova durante o ensaio. Para tanto, o sistema é composto por dois subsistemas, o sistema de monitoramento da tração e o sistema de monitoramento do tratamento térmico. Estes subsistemas geram sinais que são centralizados por uma interface analógico/digital e processados em um microcomputador.

O subsistema de monitoramento da tração consiste de:

- 1 célula de carga modelo Z-5T, que é um equipamento sensível a variações de força aplicada, dotado de um Strain Gage, que tem a capacidade de transformar solicitações mecânicas em sinais elétricos, com capacidade de medir até 5 toneladas.
- 1 transmissor de pesagem, que é um equipamento que recebe o sinal da célula de carga e o transmite para a interface analógico/digital. Tem também a função de mostrar a intensidade da solicitação num dado instante por meio de um indicador digital.

O subsistema de monitoramento do tratamento térmico é composto por:

palavra digital correspondente de 12 bits. O software utilizado foi fornecido juntamente com a placa e tinha as seguintes variáveis de entrada:

- Endereço da placa (em hexadecimal): endereço físico da porta do computador a qual a placa está conectada.
- Canal inicial: número do canal do cartão de onde foram feitas as medições.
- Número de canais: número de canais que foram usados na aquisição.
- Número de pacotes: número de dados que foram adquiridos.
- Fator de compressão: Intervalo de armazenamento das leituras. Indica quantas leituras foram ignoradas para que uma leitura seja armazenada. Isto permite que se tenha um modo de se prolongar o tempo de aquisição. Por exemplo, se o fator de compressão for igual a 4, significa que de cada 4 leituras 1 será armazenada e as outras 3 ignoradas. Neste trabalho, o fator de compressão adotado foi de 39.600, o que conjugado com a velocidade do microcomputador, permitiu uma frequência de aquisição de 1 dado a cada 30 segundos.

Porém, para que o computador possa processá-los é necessário que exista um software de gerenciamento da placa, de modo que os sinais digitalizados sejam armazenados em bancos de memória e posteriormente processados. Juntamente com a placa foi adquirido um software que permite a aquisição e o armazenamento dos dados, que contudo não permite o seu processamento. Em alguns testes preliminares, surgiu uma dificuldade em processar os dados adquiridos em uma planilha eletrônica do tipo Microsoft Excel, visto que os dados adquiridos em dois canais, ao serem inseridos na planilha ocupavam apenas uma coluna, exigindo um trabalho manual de separação antes do processamento da planilha. Esta dificuldade fez com que procurássemos um programa que nos permitisse adquirir, armazenar e processar os dados do teste de uma só vez. Este programa, denominado SINAL, desenvolvido na Universidade Federal de Minas Gerais, nos foi gentilmente cedido sem quaisquer custos e supre perfeitamente as nossas exigências.

Finalmente, faz também parte do sistema de monitoramento um microcomputador AT-386, com a função de operar a placa A/D, armazenar e

processar os dados obtidos. A figura 3.13 mostra um esquema do sistema de monitoramento:

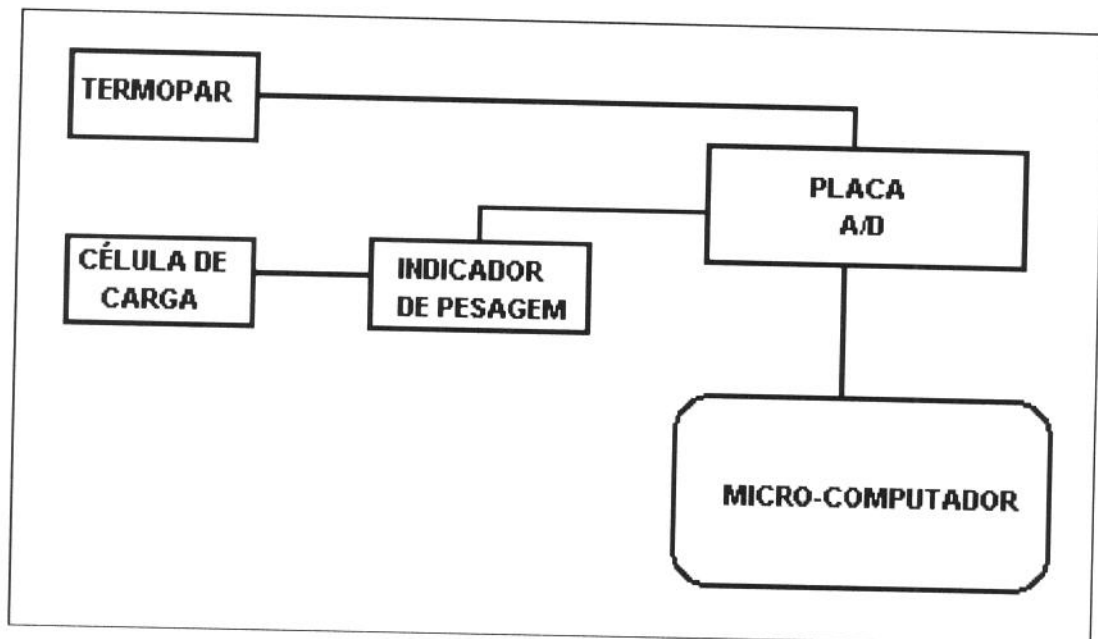


Figura 3.13- Esquema do Sistema de Monitoramento do Teste de Implante Modificado.

## CAPÍTULO 4- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O teste de implante modificado necessita, além de um equipamento especializado, de técnicas de ensaio que garantam que o fenômeno estudado seja realmente o fenômeno da trinca de reaquecimento e mais, que o equipamento permita um desempenho com confiabilidade e repetibilidade, de modo que os resultados obtidos possam ser encarados sem reservas quanto à sua fidelidade. Neste capítulo serão apresentadas as técnicas experimentais utilizadas para aferir o equipamento, bem como os procedimentos que foram seguidos para garantir uma infra-estrutura ao ensaio, ou seja, os materiais utilizados, a fabricação dos corpos de prova e das placas de teste, a preparação dos ensaios e a aquisição dos dados. Serão mostrados, também, alguns ensaios que foram executados a fim de demonstrar a flexibilidade do equipamento e a influência da estrutura metálica do equipamento no ensaio.

### 4.1- MATERIAIS

Para que o equipamento para o teste de implante modificado pudesse ter seu desempenho aferido, adotou-se a estratégia de submeter ao teste um aço análogo a um já testado anteriormente e citado em literatura [13,40], de modo a comparar-se os resultados obtidos com o equipamento com os resultados publicados. Decidiu-se, também, testar um aço reconhecidamente não suscetível, a fim de se estudar o seu comportamento sob a ação do equipamento e, dessa maneira, fazer uma comparação entre os comportamentos dos dois aços. Este último material foi testado com o objetivo de demonstrar que o equipamento destina-se exclusivamente ao teste de materiais suscetíveis a trinca de reaquecimento.

Com base nestes parâmetros, optou-se por testar os aços ABNT 1045 e SAR 80 T<sup>✂</sup>, que são aços estruturais utilizados, respectivamente, como aço de uso geral e para a fabricação de chassis de caminhões, implementos

---

<sup>✂</sup> A sigla significa **Soldável de Alta Resistência**, com limite de resistência de **80 Kgf/mm<sup>2</sup>**, Temperado. O aço em questão foi temperado e revenido.

agrícolas, máquinas de terraplanagem e plataformas marítimas, e cujas composições e propriedades são apresentadas nas tabela 4.1 e 4.2:

Tabela 4.1- Composição química (em % em peso) e propriedades mecânicas do aço ABNT 1045 .

C	Mn	P	S	Limite de escoamento	Limite de resistência
0,43-0,50	0,60-0,90	0,040 (MAX)	0,050 (MAX)	530 MPa	625 MPa

Tabela 4.2- Composição química (em % em peso) e propriedades mecânicas do aço SAR 80 T.

C	0,13
Mn	0,99
Si	0,22
S	0,0063
P	0,029
Ni	0,027
Cu	0,27
Cr	0,55
Mo	0,33
Al <sub>T</sub>	0,058
Nb	<0,005
V	0,028
Ti	0,016
Limite de Escoamento	734 MPa (74,9Kgf/mm <sup>2</sup> )
Limite de Resistência	784 MPa (80 Kgf/mm <sup>2</sup> )

#### 4.2- Confeção dos corpos de prova e placas de teste

O aço ABNT 1045 foi fornecido na forma de barras cilíndricas de 25,4 mm de diâmetro (1 polegada- medida comercial). O aço SAR 80 T foi fornecido na forma de blocos de medidas 240x130x50 mm, sendo que todos os blocos pertenciam originalmente à mesma chapa, tendo sido cortados a plasma. Tanto um aço como o outro foram usinados de acordo com o desenho da



figura 4.4. As placas de teste foram feitas com o aço SAR 80 T, de acordo com o desenho mostrado na figura 4.5.

Para a confecção dos corpos de prova tomou-se o cuidado de se cortar pedaços com o sentido de corte paralelo ao sentido de laminação, de modo a se ter os grãos ordenados no sentido da solicitação de tração e, dessa maneira se prevenir contra a interferência da microestrutura nos resultados dos ensaios. Para a confecção das placas de teste os blocos de SAR 80 T foram cortados em uma serra de fita e em seguida furados para a passagem do corpo de prova e dos termopares. Após os ensaios, quando ocorria o rompimento do corpo de prova, a placa de teste era usinada de modo a se retirar o cordão de solda depositado sobre ela e em seguida furado novamente, com o objetivo de se reutilizar a placa. Este procedimento de reutilização das placas era seguido também em alguns casos em que não se verificava o rompimento do corpo de prova e não se considerou necessário o exame metalográfico. O procedimento de reutilização das placas representou um fator de economia para os ensaios, uma vez que garantiu a economia de material. A figura 4.1 mostra um corpo de prova:

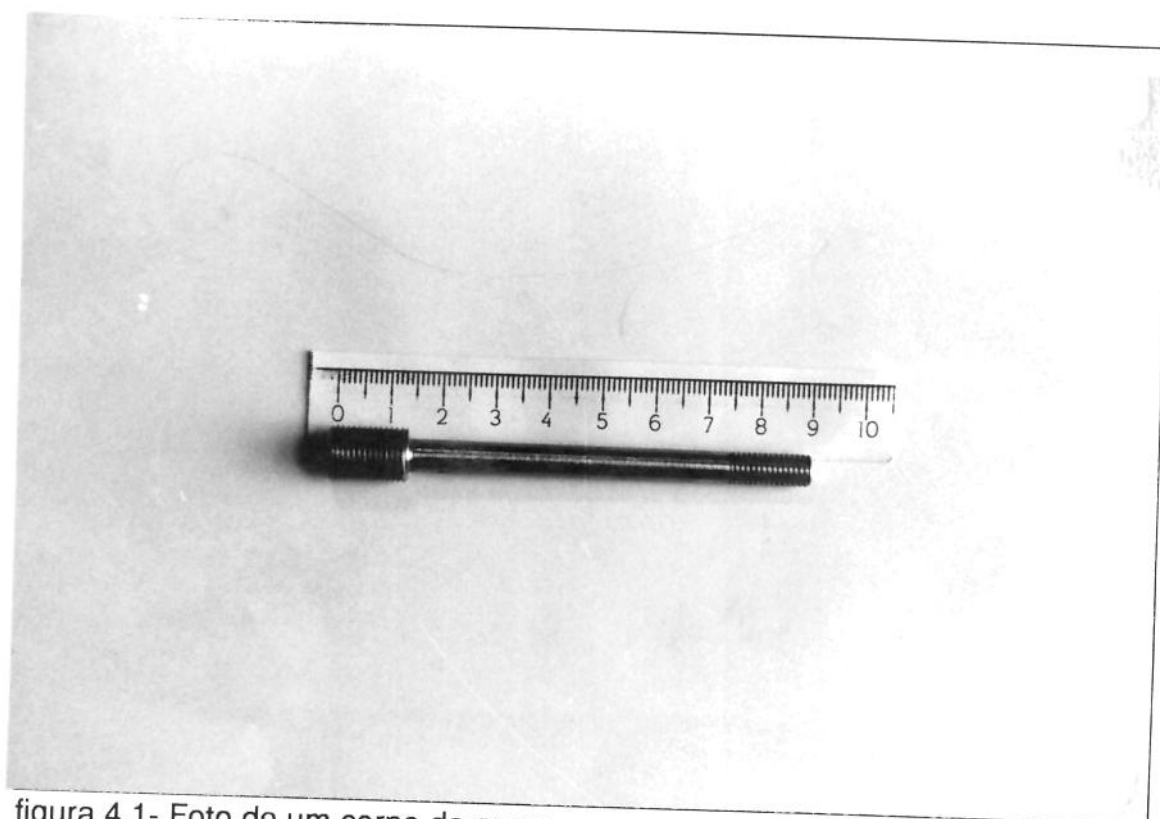


figura 4.1- Foto de um corpo de prova

A figura 4.2 mostra uma das placas de teste utilizadas neste trabalho:

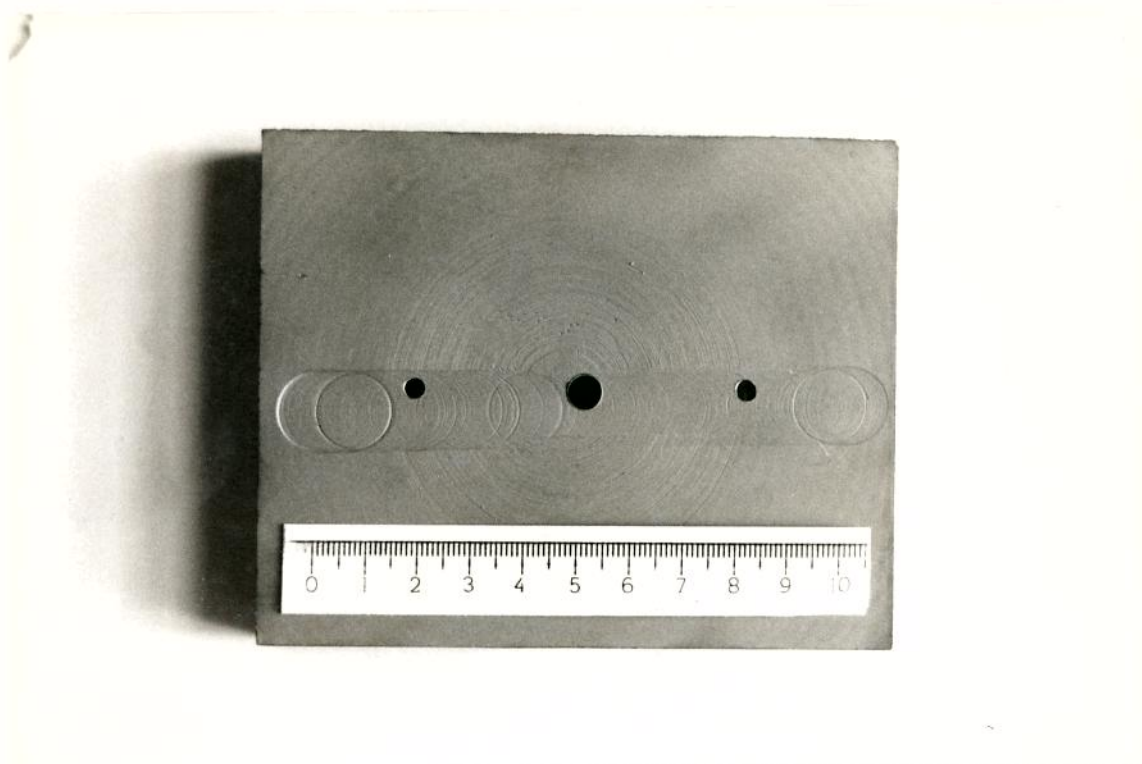


Figura 4.2- Foto de uma placa de teste

#### 4.3- PREPARAÇÃO DOS ENSAIOS

Antes de cada ensaio, procedeu-se à limpeza do corpo de prova da seguinte maneira: Primeiramente o corpo de prova era limpo com uma estopa ou pano, uma vez que ele era armazenado em banho de óleo, sendo em seguida lavado com água e detergente, a fim de se retirar qualquer vestígio de óleo. Em seguida era limpo por ultra-som em banho de acetona por 5 minutos. Após a limpeza o corpo de prova era embalado em papel a fim de ser protegido do contato com contaminantes, tais como a gordura da pele e eventuais sujeiras. Esta proteção era utilizada apenas durante o transporte do corpo de prova de um laboratório a outro, não tendo como objetivo o armazenamento por períodos prolongados.

A placa de teste era lavada com água e detergente e em seguida seca com ar comprimido. Em seguida era jateada com areia até a remoção total da camada de óxidos da superfície do metal, tomando-se especial cuidado com os

furos da placa, para evitar a presença de materiais contaminantes em contato com o corpo de prova.

4.4-PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM

Com o objetivo de se obter uma boa repetibilidade no processo de soldagem, utilizou-se o processo MAG automatizado, acoplando-se a tocha à um dispositivo de deslocamento com velocidade controlada (tartaruga), que propiciava uma velocidade de soldagem constante. Procedeu-se, também a uma alteração no equipamento padrão de soldagem MIG/MAG, a fim de se permitir o acionamento remoto da tocha por meio de um interruptor. Desta maneira uma única pessoa seria capaz de executar o ensaio. Os parâmetros de soldagem foram otimizados de modo a se obter um cordão razoavelmente largo e de boa penetração. Os parâmetros obtidos estão listados na tabela 4.3

Tabela 4.3- Parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho

Voltagem	22 V
Corrente	220 A
Velocidade de Soldagem	150 mm/min
Velocidade do Arame	5 m/min
Insumo de Calor	1,94 KJ/mm

:  
Para estes parâmetros, utilizou-se o arame AWS ER 70S-6, com diâmetro de 1,2 mm e proteção gasosa de CO<sub>2</sub>, a uma vazão de 15 litros por minuto. A figura 4.3 mostra o equipamento utilizado para a soldagem, onde se pode ver o dispositivo de deslocamento e a tocha fixada a ele. O dispositivo se movimenta sobre um trilho colocado sobre uma mesa ao lado do equipamento de teste. Apesar do dispositivo contar com alguma liberdade no que se refere a posição da tocha é recomendável que ambos, o dispositivo e a superfície onde será depositado o cordão de solda, estejam na mesma altura.



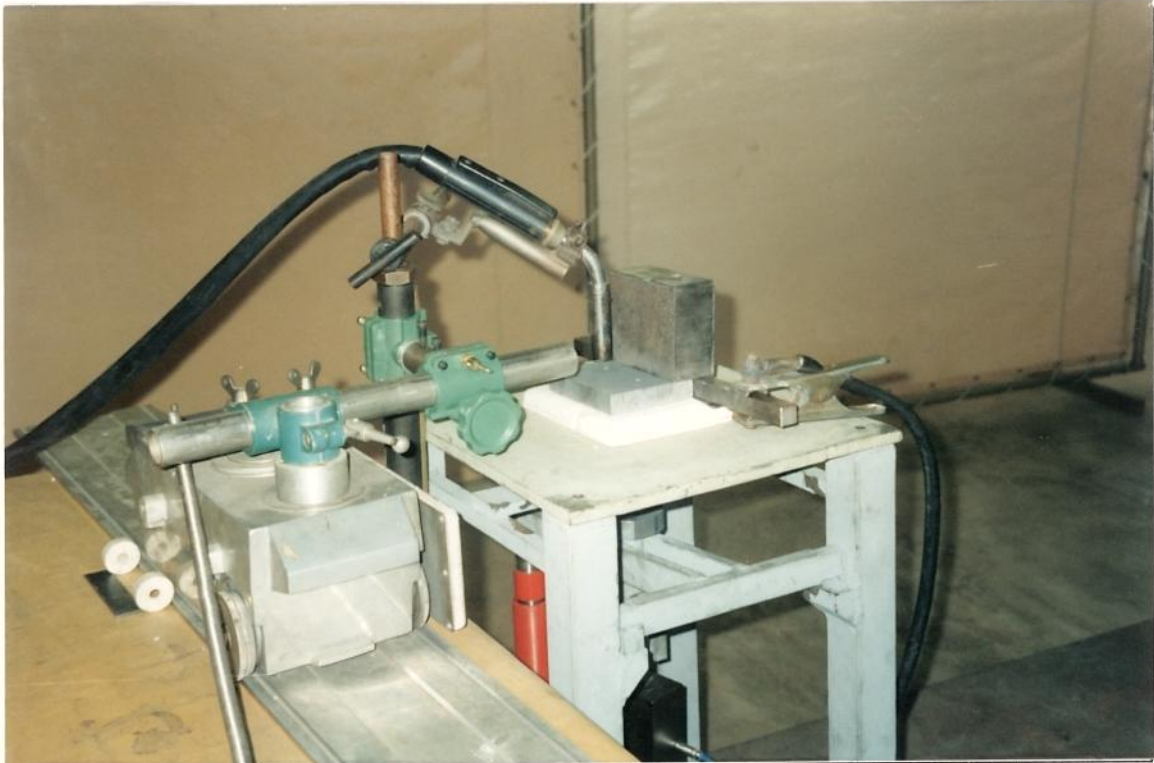


Figura 4.3- equipamento de soldagem utilizado no teste

A figura 4.4 mostra um dos cordões de solda obtidos:



Figura 4.4- Cordão de solda obtido

#### 4.5- PROCEDIMENTOS E ESTRATÉGIA DE TESTE

No início dos testes, a principal preocupação foi assegurar a confiabilidade e a efetividade do equipamento. Para tanto, seguiu-se os seguintes procedimentos:

1º)Realizaram-se 05 testes de trinca de Hidrogênio com o aço SAR 80 T, para assegurar que os trincamentos, quando ocorridos, não fossem devido à influência do Hidrogênio, uma vez que este aço é reconhecidamente suscetível a este tipo de trinca, principalmente quando soldado sem pré-aquecimento [15]. O procedimento de teste será detalhado no item 4.5.2.

2º)Realizaram-se 28 testes de trinca de reaquecimento em um material suscetível, conforme citado, que pudesse ter seus resultados comparados com outros resultados publicados. No item 4.5.1 veremos os procedimentos de teste.

3º)Com os resultados obtidos nos testes de trinca de reaquecimento, estabeleceu-se um determinado valor de tensão de tração para o qual sempre se verificaria o rompimento do corpo de prova depois de algum tempo de teste e outro valor de tensão de tração para o qual nunca se verificaria o rompimento. Para estes valores de tensão os testes foram repetidos 03 vezes cada, de modo a analisar-se a repetibilidade dos testes e a confiabilidade do equipamento.

4º)Realizaram-se 05 testes com um material não suscetível, conforme citado, de modo a demonstrarmos que o equipamento se limita a testar os metais ensaiados quanto a suscetibilidade à trinca de reaquecimento. O procedimento de teste será detalhado no item 4.5.1.

5º)Realizou-se 01 teste com o objetivo específico de demonstrar a versatilidade do sistema de aquecimento, no qual foram programadas 02 rampas diferentes de aquecimento, 01 de resfriamento e dois patamares.

6º)Realizou-se um teste com o objetivo de se determinar a máxima velocidade de aquecimento do forno, onde foi ajustado uma temperatura de patamar e a velocidade de aquecimento foi função da potência do forno.



#### 4.5.1- TESTES DE TRINCA DE REAQUECIMENTO

Após realizados os procedimentos de limpeza do corpo de prova e da placa de teste, o corpo de prova era então rosqueado ao sistema de tração do equipamento e em seguida a placa de teste era colocada sobre o corpo de prova, de maneira que o furo da placa se ajustasse ao corpo de prova. O cilindro hidráulico era então acionado de modo a se induzir uma tensão de tração no sistema entre a barra inferior e os braços da alavanca (figura 4.6). Durante o acionamento do cilindro hidráulico o corpo de prova sobe e entra na placa até que se alcance o nível de tensão desejado. Este procedimento se repete várias vezes até que se encontre um ponto de ajuste entre o nível de tensão e a altura da extremidade superior do corpo de prova, que deve ser a mesma da face superior da placa de teste. Este ajuste era feito por meio de uma porca situada na parte inferior do equipamento, conforme pode ser visto na figura 4.5.



Figura 4.5- Ajuste de tensão de tração por meio da porca

Uma vez que este ponto de ajuste era alcançado, o cordão de solda era depositado sobre a placa de teste, de maneira que o corpo de prova ficasse soldado à placa. Tão logo o cordão de solda era depositado, ajustavam-se os termopares nos furos correspondentes da placa (figura 4.5), sendo um termopar ligado ao controlador do forno e o outro ligado à placa A/D. Quando a temperatura, monitorada pelos termopares, chegava a 150 °C, o cilindro hidráulico era vagarosamente aliviado de modo que a tensão de tração fosse gradualmente transmitida ao corpo de prova. Devido à acomodação dos componentes móveis do equipamento, sobretudo das pastilhas de cerâmica utilizadas como apoio da placa de teste, era comum que ocorresse uma queda no valor da tensão de tração quando da transmissão da tensão ao corpo de prova. Esta queda era então corrigida pelo ajuste da porca, conforme mostrado na figura 4.5. Quando, então, a temperatura do conjunto placa de teste+corpo de prova alcançava a temperatura ambiente, o forno era ajustado sobre o equipamento e dava-se início ao tratamento térmico de alívio de tensão. Este tratamento térmico consistiu de um aquecimento à razão de 200 °C por hora até que se alcançasse a temperatura de 600 °C, temperatura esta mantida por 20 horas ou até o rompimento do corpo de prova, seguido de um resfriamento à razão também de 200 °C/hora. Estes valores de velocidade de aquecimento e resfriamento foram também utilizados por outros pesquisadores, enquadrando-se na filosofia de teste adotada neste trabalho, de utilizar os procedimentos citados em literatura [13,40] para a comparação dos resultados obtidos e, conseqüentemente, a aferição do equipamento. Este procedimento foi aplicado tanto para o aço SAR 80 T quanto para o ABNT 1045, de modo a se obter uma comparação do comportamento dos dois aços quando submetidos ao teste de implante modificado. As figuras 4.6 e 4.7 mostram o equipamento de teste durante um ensaio de trinca de reaquecimento e um detalhamento do forno com o seu sistema de controle:





Figura 4.6- Equipamento de teste para trinca de reaquecimento, tal como projetado neste trabalho.

Na figura 4.6 pode-se notar mais facilmente alguns detalhes referenciados à figura 3.6, tais como os braços de alavanca e as cabeças de articulação, que são acopladas à célula de carga. Pode-se ter também uma perspectiva das dimensões do equipamento como um todo.



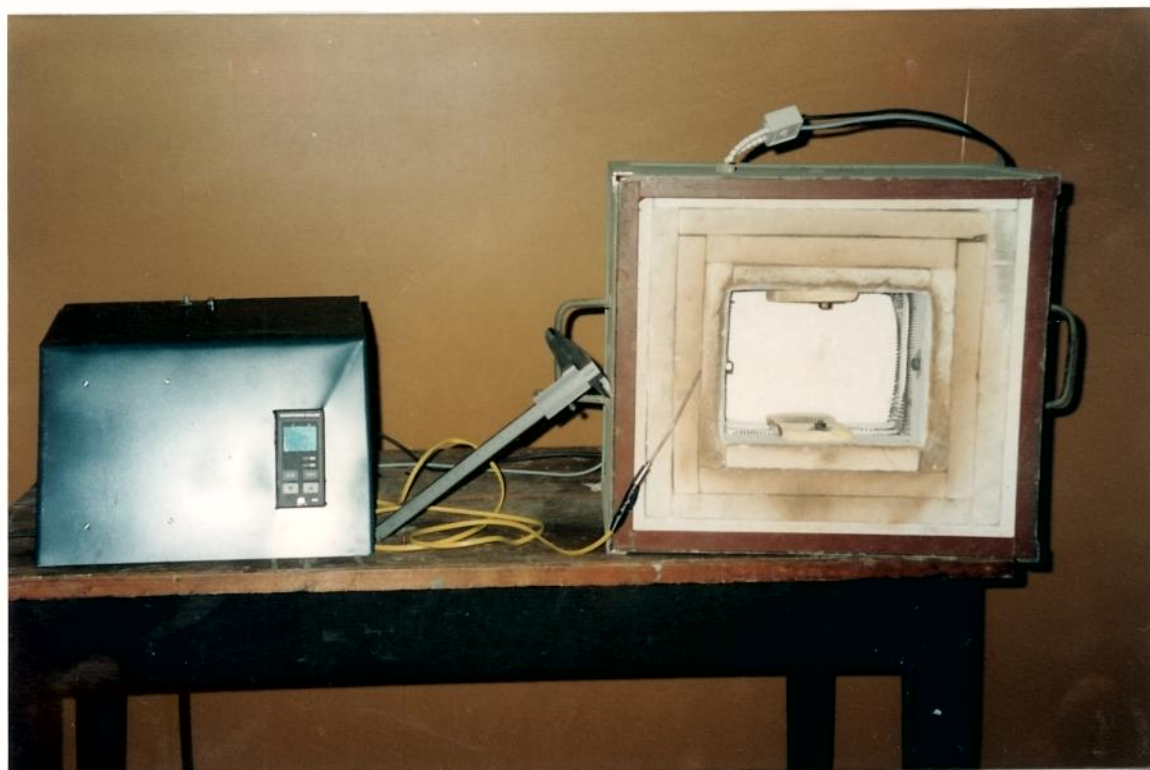


Figura 4.7- Forno de tratamento térmico projetado e construído neste trabalho, com seu sistema de controle.

#### 4.5.2- TESTES DE TRINCA A FRIO

O teste de trinca a frio utilizado, conhecido como teste de implante, consiste dos mesmos procedimentos detalhados no item 4.5.1, com exceção do tratamento térmico de alívio de tensão. Nos testes realizados, a tensão aplicada ao corpo de prova foi de 495 MPa (50,5 Kgf/mm<sup>2</sup>) durante 20 horas. Foram realizados 05 testes, sempre com a mesma carga, a fim de se garantir a repetibilidade do ensaio.

Como este ensaio resume-se à aplicação de uma carga constante ao corpo de prova durante um determinado espaço de tempo, decidiu-se que não seria necessário o monitoramento por computador, uma vez que não se esperava uma variação nos valores de carga aplicada. Foi feito, então, um controle visual da carga de hora em hora. A figura 4.8 mostra o equipamento tal como foi utilizado nos testes de trinca a frio.



Figura 4.8- Equipamento de teste sem a utilização do forno

#### 4.6- AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA SOB A AÇÃO DOS ESFORÇOS

Como a estrutura metálica do equipamento não é totalmente rígida, é de se esperar que ocorram deformações de acordo com a solicitação imposta a ela. No caso especial da solicitação sobre a barra inferior (figuras 3.6 e 4.6), ocorre uma flexão para cima, sendo que a tensão sobre a barra faz com que esta atue como uma mola, ajudando a tracionar o corpo de prova. Para evitar grandes deformações nesta barra, e também evitar que a deformação atinja o limite plástico do material, foi providenciado um reforço estrutural com o

objetivo de aumentar o momento de inércia da barra, reduzindo, assim sua flexão. A figura 4.9 mostra o reforço adotado. Para entender como se dá esta influência da flexão da barra inferior sobre o desenrolar do ensaio mediu-se a deformação desta sob a ação de esforços variados, de modo a se obter uma curva da mola. A medida da deformação foi feita por meio de um relógio comparador colocado sob a barra inferior e em contato com esta, de maneira que conforme se aplicasse a tensão na barra, a deformação fosse acusada pelo relógio comparador. Estas medidas e a curva resultante serão apresentadas no próximo capítulo.

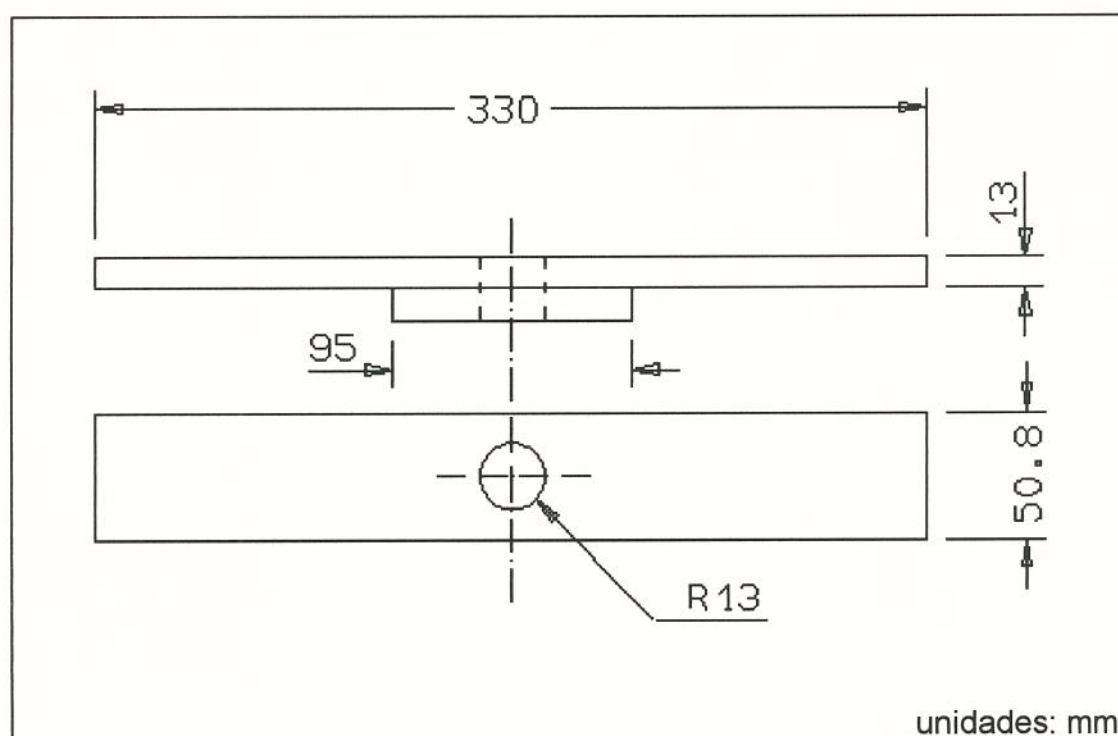


Figura 4.9- Reforço estrutural junto à barra inferior.

#### 4.7- ENSAIOS DE FLEXIBILIDADE DO SISTEMA DE AQUECIMENTO

Com o objetivo de demonstrar as reais capacidades do sistema de aquecimento, executaram-se dois ensaios: o primeiro para demonstrar a velocidade máxima de aquecimento do forno, e o segundo onde foram programados dois patamares, ou seja, duas temperaturas de tratamento térmico que não variam com o tempo, que foram alcançados com diferentes



velocidades de aquecimento. Durante estes ensaios foram coletados somente dados de temperatura, que serão apresentados no próximo capítulo.

#### 4.8- AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

Durante a realização dos testes foram aqisitados dados de temperatura (com exceção dos testes de trinca de Hidrogênio) e de carga de tração. Os dados de temperatura foram captados por dois termopares tipo K, com 2 mm de diâmetro, localizados em pontos eqüidistantes do corpo de prova, em contato com a porção inferior do cordão de solda. Desta maneira era possível monitorar indiretamente a temperatura na ZAC do corpo de prova, que é o local onde se dá a trinca de reaquecimento. O fato dos termopares não estarem em contato direto com o corpo de prova não teve maiores conseqüências, visto que se trata de um ensaio de longa duração e que tanto a placa de teste como a parte do corpo de prova onde ocorre a trinca de reaquecimento e as pontas dos termopares estariam dentro do forno, sem diferenças significantes de temperatura.

Os dados de carga de tração eram monitorados por uma célula de carga do tipo universal (tração/compressão) conectada a um transmissor analógico que, por sua vez, era conectado à placa A/D. O transmissor analógico era equipado com um visor de cristal líquido que, a exemplo da temperatura, também permitia o monitoramento visual em tempo real do esforço de tração. A placa A/D dispunha de um software de aquisição de dados que permite diferentes frequências de aquisição. No caso dos testes de implante modificado e do teste de verificação da versatilidade do forno, a frequência de aquisição foi de 1 ponto a cada 30 segundos; para o teste de verificação da máxima velocidade de aquecimento do forno, foi utilizada uma frequência de 1 ponto por segundo. Após terminados os ensaios dava-se a gravação dos dados aqisitados no microcomputador, após o que, procedia-se ao processamento dos dados obtidos via planilhas eletrônicas. A figura 4.10 mostra o sistema de monitoramento utilizado no teste.

#### 4.9- METALOGRAFIA E ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA.

O procedimento metalográfico foi adotado com o objetivo de se caracterizar as trincas ocorridas como trincas de reaquecimento. Para tanto, tentou-se evidenciar:

- \* O tamanho da zona afetada pelo calor
- \* Que a trinca ocorre na região de granulação grosseira da ZAC.



Figura 4.10- Sistema de monitoramento utilizado no teste de implante modificado

Para se levar a efeito tal proposta, foi necessário realizar análises macro e micrográficas. Primeiramente cortou-se as amostras em tamanhos adequados para que pudessem ser embutidas. Isto foi conseguido com a utilização de uma serra de fita e uma serra de disco do tipo "cut-off". Com as amostras cortadas, seguiu-se os procedimentos normais de embutimento para, em seguida, proceder-se ao lixamento das amostras. O lixamento foi realizado numa politriz padrão, utilizando-se lixas de granulometrias gradativamente menores (120, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh). Em seguida as amostras foram atacadas por Nital a 2% por aproximadamente 15 segundos, sendo em



seguida lavadas com acetona e secas em ar quente. As amostras, assim preparadas, foram então levadas a um microscópio óptico para análise e documentação fotográfica.

A figura 4.11 mostra uma vista geral dos equipamentos de soldagem, monitoramento e de teste.



Figura 4.11- Vista geral dos equipamentos utilizados para os ensaios.

## **CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **INTRODUÇÃO**

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com o equipamento para teste de implante modificado projetado e construído no decorrer deste trabalho. Estes resultados serão interpretados tendo em vista o desempenho do equipamento. Serão abordados os resultados dos seguintes ensaios:

- Testes de trinca a frio.
- Teste de implante modificado
- Testes de repetibilidade do equipamento
- Testes de avaliação da flexibilidade e de máxima potência do sistema de aquecimento
- Teste de avaliação da reação da estrutura sob a ação dos esforços inerentes aos testes

Também serão apresentados durante o decorrer do capítulo, como forma de complementação dos dados obtidos, os resultados dos ensaios metalográficos realizados.

#### **5.1- TESTES DE TRINCA A FRIO**

Os testes de trinca a frio aplicados ao aço SAR 80 T, num total de 5 testes, foram executados à carga constante de 495 MPa durante 24 horas à temperatura ambiente. Alguns órgãos normativos de diferentes países (IIW e Alemanha) recomendam a aplicação de uma carga igual ao limite de escoamento do aço testado, enquanto que em outros países (Japão e França) tal procedimento não é recomendado em suas normas, não especificando o nível de tensão a ser aplicado [35]. Como o objetivo destes testes é garantir que as trincas que porventura ocorressem no decorrer deste trabalho não fossem devido a fragilização por Hidrogênio, optou-se pela aplicação de uma carga igual à máxima carga imposta durante os testes de trinca de rea aquecimento, ou seja, 495 MPa, o que representa quase 70% do limite de

escoamento do SAR 80 T. A duração recomendada para o ensaio é de no máximo 24 horas, que foi o período adotado para estes testes [35]. As condições de soldagem (tensão, corrente e insumo de calor) foram sempre os mesmos adotados e fixados para todos os testes realizados no decorrer deste trabalho (item 3.4). Os resultados obtidos estão expostos de maneira gráfica na figura 5.1:

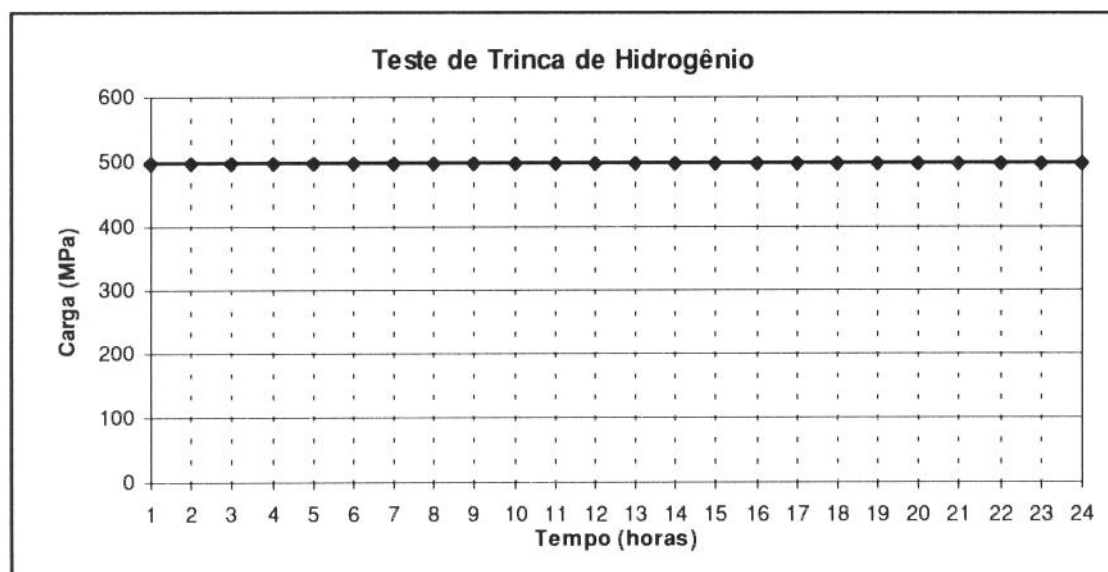


Figura 5.1- Valores de tensão em função do tempo obtidos nos testes de Trinca de Hidrogênio.

Em nenhum dos testes realizados foi observada a ocorrência de trincas. A tensão imposta ao corpo de prova não apresentou variações durante o decorrer dos ensaios. Estes resultados eram esperados e foram fundamentais para o desenvolvimento do trabalho como um todo, porque garantiram que a solda estava livre da contaminação por Hidrogênio, o que poderia mascarar os resultados dos outros ensaios. O fato de não ter ocorrido trincamento induzido pelo Hidrogênio se deve, principalmente, ao fato de ter sido executado um rigoroso procedimento de limpeza dos corpos de prova e das placas de teste utilizados, conforme citado no item 3.3. Conforme comentou-se anteriormente, no item 1.6, para que ocorra a trinca de Hidrogênio é necessário a conjunção de três fatores simultaneamente: que exista uma microestrutura suscetível; que tensões de tração estejam agindo sobre a junta e que exista contaminação por Hidrogênio em proporções suficientes [12]. O material tem uma microestrutura



reconhecidamente suscetível [15], a tensão foi imposta em níveis elevados e mesmo assim a trinca não ocorreu, o que nos garante que os procedimentos adotados para a limpeza dos corpos de prova e placas de teste foram eficazes em retirar qualquer contaminação de Hidrogênio.

Baseado nestes resultados, pode-se afirmar que as trincas que porventura se verificaram nos ensaios durante a utilização do equipamento com o aço SAR 80 T não foram causadas pela presença de Hidrogênio.

## 5.2- TESTES DE TRINCA DE REAQUECIMENTO

O teste de implante modificado fornece resultados em valores de tensão em função da temperatura e do tempo de ensaio. Estes valores foram definidos como [13,40]:

$\sigma_{AS}$ : Tensão de restrição aplicada logo após a soldagem e antes do início do tratamento térmico.

$\sigma_{AS-CRIT.}$ : Valor de tensão máximo aplicado logo após a soldagem e antes do tratamento térmico para o qual não ocorre a trinca de reaquecimento.

$\sigma_{PTT}$ : Tensão de restrição atuando sobre o corpo de prova ao final do tratamento térmico.

$\sigma_{PTT-CRIT.}$ : Tensão de restrição máxima pós tratamento térmico para o qual não ocorre a trinca de reaquecimento.

Os resultados são analisados também em função do relaxamento de tensão total que ocorre durante o ensaio. Para esta análise foi definido o parâmetro R [40]:

$$R_{600^{\circ}20h} = \frac{\sigma_{AS} - \sigma_{PTT}}{\sigma_{AS}} \times 100 \quad (18)$$

Baseado nestes parâmetros, pode-se dizer que quanto menor for o valor de  $\sigma_{AS-CRIT.}$ , ou seja, o valor da tensão aplicada após a soldagem e antes do tratamento térmico que o metal suporte sem apresentar trincas, e de R, ou seja, o valor de relaxamento de tensão que o metal apresente durante o ensaio, mais suscetível à trinca de reaquecimento será o metal.

Os resultados dos testes de trinca de rea aquecimento efetuados nos aços SAR 80 T e ABNT 1045 são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1- resultados dos Testes de implante modificado realizados neste trabalho

TESTE Nº	CARGA (MPa)	MATERIAL	RESULTADO
1	495	SAR 80 T	ROMPEU
2	412,5	SAR 80 T	ROMPEU
3	330	SAR 80 T	ROMPEU
4	247,5	SAR 80 T	ROMPEU
5	185,6	SAR 80 T	ROMPEU
6	165	SAR 80 T	ROMPEU
7	165	SAR 80 T	ROMPEU
8	165	SAR 80 T	ROMPEU
9	144,4	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
10	144,4	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
11	152,6	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
12	156,7	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
13	160,9	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
14	162,9	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
15	165	SAR 80 T	ROMPEU
16	162,9	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
17	162,9	SAR 80 T	ROMPEU
18	160,9	SAR 80 T	ROMPEU
19	156,7	SAR 80 T	ROMPEU
20	152,6	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
21	148,5	SAR 80 T	ROMPEU
22	144,4	SAR 80 T	ROMPEU
23	123,7	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
24	136,1	SAR 80 T	ROMPEU
25	127,9	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
26	132	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
27	132	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
28	132	SAR 80 T	NÃO ROMPEU
1	247,5	ABNT 1045	NÃO ROMPEU
2	321,7	ABNT 1045	NÃO ROMPEU
3	370	ABNT 1045	NÃO ROMPEU
4	321,7	ABNT 1045	NÃO ROMPEU
5	321,7	ABNT 1045	NÃO ROMPEU

Os testes realizados com o aço SAR 80 T listados nesta tabela estão ordenados em ordem cronológica, e foram realizados de modo a se aferir os resultados obtidos com o equipamento de teste construído neste trabalho por

meio da comparação dos resultados obtidos com os resultados publicados em literatura [13, 40]. Para tanto, partiu-se de uma carga elevada e foi-se baixando a carga gradativamente, de modo a se observar o comportamento do aço sob determinados valores de tensão. Alguns testes foram repetidos, tais como os testes a 165 MPa (testes 6, 7, 8 e 15), para os quais sempre se verificou o rompimento dos corpos de prova, e os testes a 132 MPa (testes 26, 27 e 28), para os quais o rompimento nunca se verificou. Estes valores de tensão se revelaram valores limites para os quais o comportamento do aço se manteve constante. Com este procedimento de repetição dos testes em valores limites buscou-se, além de nos certificarmos da efetividade destes valores, garantir a repetibilidade dos testes e a confiabilidade do equipamento utilizado com o SAR 80 T. Entre estes dois valores, verificou-se a existência de uma faixa de valores de tensão para os quais o teste apresentou resultados ambíguos, ora apresentando o rompimento, ora não apresentando, sendo caracterizada como uma **faixa de incerteza** do material no tocante a trinca de reaquecimento. A figura 5.2 mostra uma macrografia realizada para se determinar a extensão da zona afetada pelo calor.

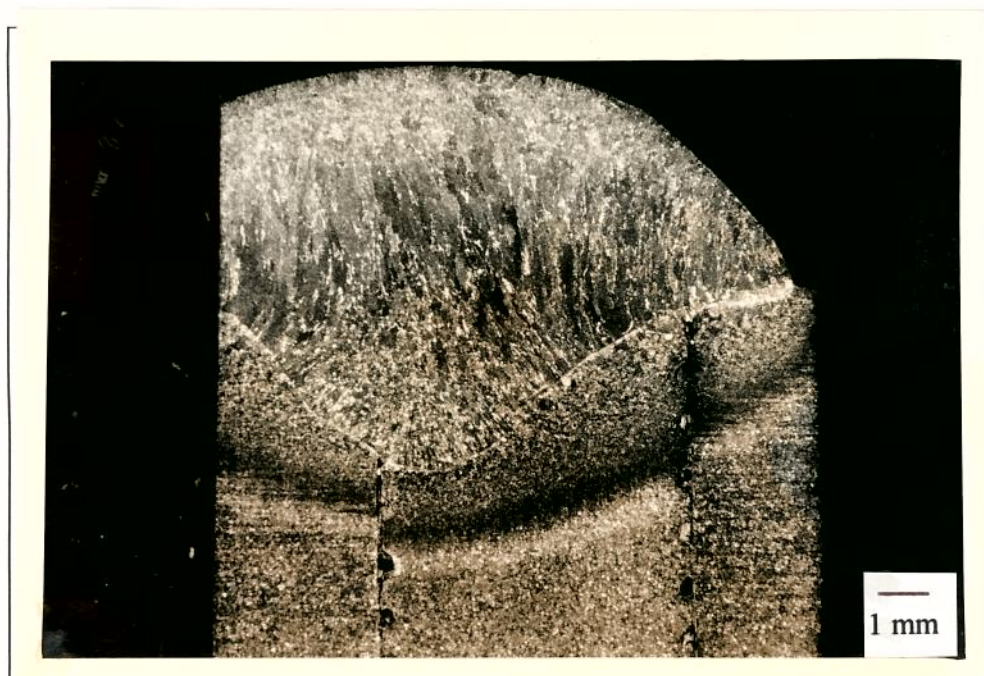


Figura 5.2- Macrografia da seção transversal de uma solda mostrando a extensão da ZAC.



Nos testes de implante modificado realizados neste trabalho o parâmetro variável foi a tensão imposta ao corpo de prova, fixando-se os parâmetros de soldagem, as velocidades de aquecimento e resfriamento, a temperatura e a duração do tratamento térmico. A figura 5.3 mostra algumas curvas de tensão versus deformação obtidas para diferentes valores de tensão, onde os pontos marcados por um "x" indicam o momento em que ocorreu a fratura do corpo de prova.

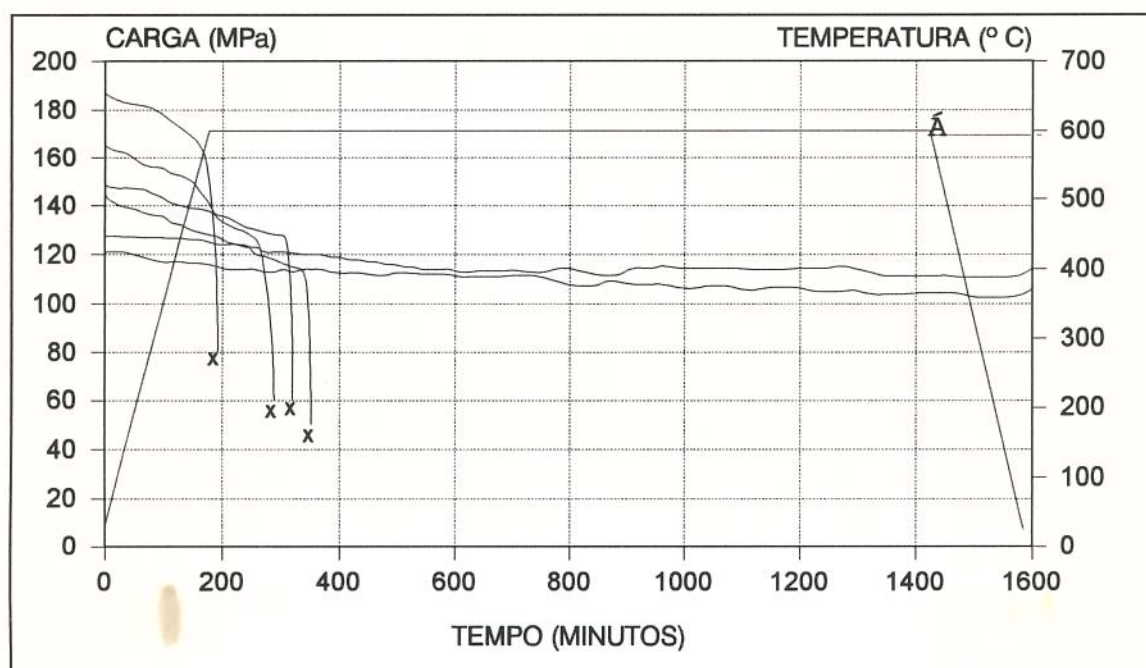


Figura 5.3- Curvas obtidas com o teste de implante modificado aplicado ao aço SAR 80 T.

Conforme pode-se ver na figura 5.3, a medida que o corpo de prova vai sendo gradualmente submetido a tensões iniciais menores o rompimento leva mais tempo para ocorrer, até que para um determinado valor de tensão não ocorre o rompimento. Nestes ensaios, verificou-se o rompimento dos corpos de prova para valores acima de 165 MPa. Para os valores compreendidos entre 132 e 165 MPa verificou-se a ocorrência de rompimentos, porém estes rompimentos não se deram em 100% dos ensaios nesta faixa de solicitação, sendo que mesmo para valores iguais de carga o rompimento poderia se verificar ou não, conforme pode ser visto mais detalhadamente na tabela 5.1, testes 9 a 28. Ainda na figura 5.3 é traçada a curva do ciclo térmico de alívio

de tensão imposto ao corpo de prova. É interessante notar a grande precisão alcançada com os sistemas de aquecimento, aplicação de carga e aquisição de dados, que permitiram que os ensaios fossem levados a efeito com grande precisão.

A análise metalográfica revelou que mesmo os corpos de prova ensaiados dentro da faixa de incerteza que não apresentaram rompimento apresentavam trincas. Por este motivo, considerou-se este intervalo como uma faixa de incerteza, onde o rompimento do corpo de prova pode ou não se verificar. Contudo, para efeito de resultados, considerou-se que o valor máximo admissível para o qual nunca se verificam trincas é o de 132 MPa. A figura 5.4 mostra uma metalografia de um corpo de prova rompido.



Figura 5.4- Macrografia de uma seção transversal a um cordão de solda, com um corpo de prova rompido.

Note-se que o rompimento se deu dentro da ZAC, na região de granulação mais grosseira desta, no limite entre a ZAC e a zona fundida da solda.

Já na figura 5.5 pode-se ver duas curvas obtidas para um mesmo valor de tensão, tensão esta situada dentro dos limites da zona de incerteza, para a



qual o aço mostrou comportamentos totalmente diferentes, em uma ocasião apresentando o rompimento do corpo de prova e em outra ocasião não apresentando este rompimento.

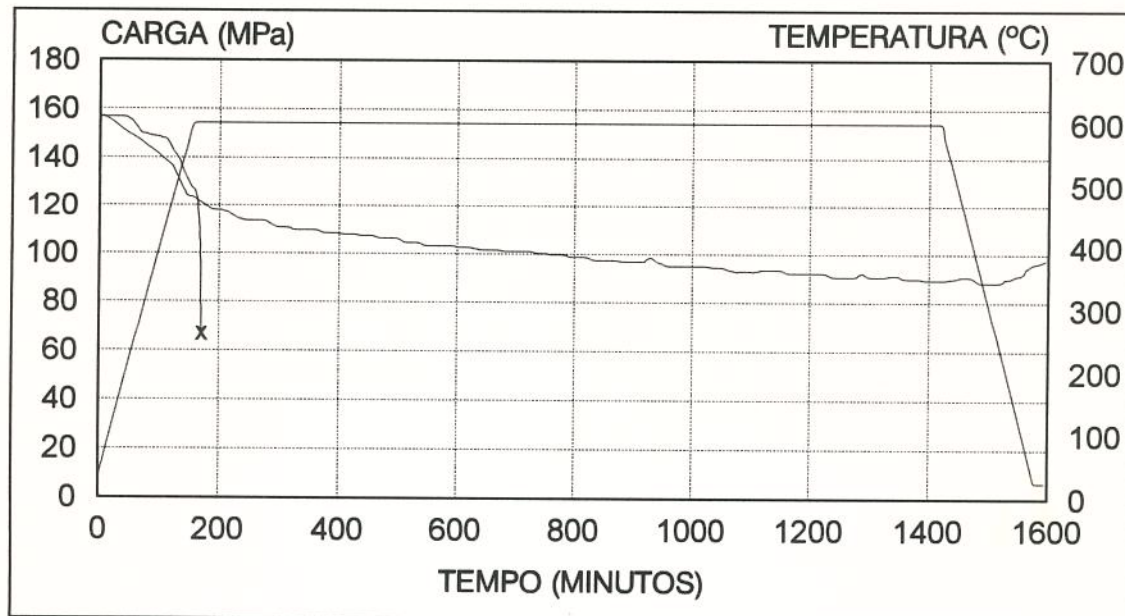


Figura 5.5- Curvas de tensão versus tempo para uma tensão localizada dentro do intervalo entre 132 e 165 MPa.

Na mesma figura 5.5 é mostrado que, para um mesmo valor de  $\sigma_{AS}$ , o aço comportou-se de maneiras distintas, em uma ocasião apresentando rompimento e noutra ocasião não apresentando. Este comportamento ambíguo do material dentro desta faixa de incerteza é corroborado pelos ensaios 9, 10 e 22; 12 e 22; 13 e 18; 14, 16 e 17; conforme pode-se ver na tabela 5.1. Nesta mesma figura é traçada a curva do ciclo térmico imposto ao corpo de prova.

Considerando-se que a geometria do corpo de prova e especialmente do entalhe foram mantidas constantes; as condições de soldagem não sofreram alterações e tampouco o posicionamento do corpo de prova foi alterado, pode-se afirmar que este comportamento se deve à heterogeneidades localizadas na composição do material, que é um aço comercial e não um aço de laboratório para o qual são feitos rígidos controles de composição e homogeneização dos elementos de liga.

A figura 5.6 mostra o resultado da análise metalográfica realizado em um corpo de prova ensaiado dentro do intervalo conhecido como zona de incerteza:

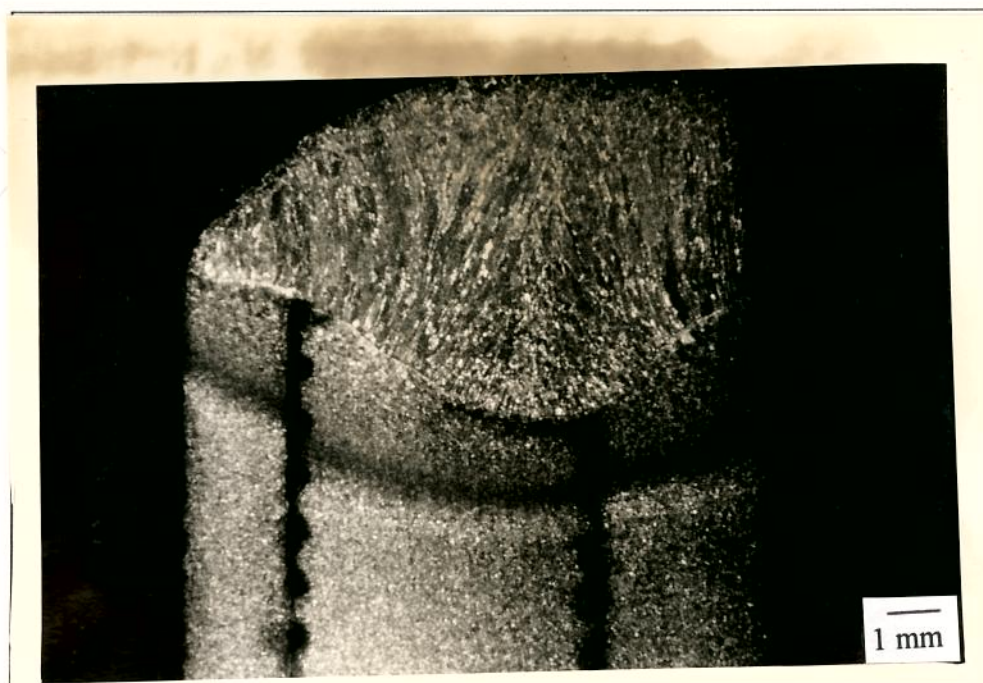


Figura 5.6- Macrografia de uma seção transversal a um cordão de solda, com a localização de uma trinca.

A figura 5.6 permite também avaliar a eficácia do entalhe como concentrador de tensão, pois pode se ver que a trinca se origina na ponta do entalhe.

Os testes realizados com o ABNT 1045 foram realizados basicamente para fornecer dados complementares sobre como um material não suscetível se comportaria no teste de implante modificado, fornecendo, assim, uma base de comparações entre os dois aços. Foram realizados 5 testes, dos quais 3 foram repetidos à carga de 321,7 MPa, fornecendo, desta maneira mais subsídios para a determinação da repetibilidade do equipamento.

Observou-se um comportamento bem diverso do aço SAR 80 T. Enquanto este apresentou um pequeno relaxamento de tensão, o ABNT 1045 apresentou relaxamentos muito maiores. Além disso o ABNT 1045 suportou níveis muito mais elevados de tensão que o SAR 80 T. A figura 5.7 mostra uma

curva representativa dos ensaios realizados com este aço, onde se pode ver o relativamente grande relaxamento de tensão alcançado, com uma tensão inicial,  $\sigma_{AS}$ , de 321,7 MPa e uma tensão final,  $\sigma_{PTT}$ , por volta de 50 MPa para um mesmo ciclo térmico.

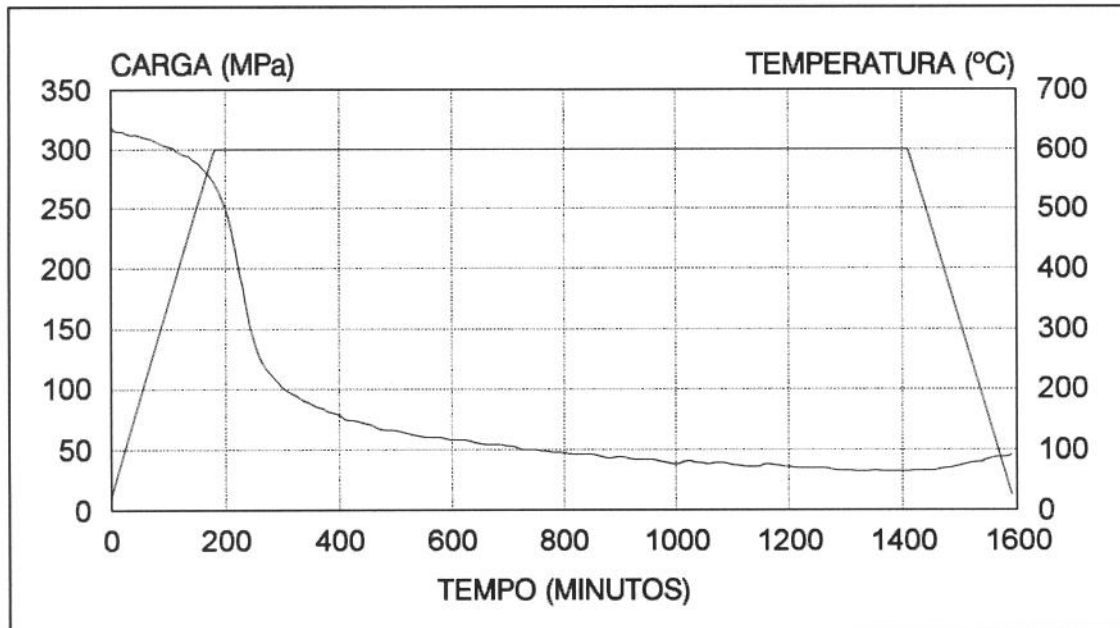


Figura 5.7- Curva do aço ABNT 1045 submetido ao teste de implante modificado.

Estes resultados confirmam a previsão inicial de que o aço não é suscetível à trinca de reaquecimento, pois, numa comparação visual das curvas das figuras 5.7 e 5.3 (curva do ensaio à 120 MPa) torna-se claro que o aço suscetível apresenta níveis de relaxamento muito menores que o ABNT 1045, ou seja, a diferença entre as tensões iniciais e finais são mais expressivas para o ABNT 1045 do que para o SAR 80 T.

Calculando-se o parâmetro R para os dois aços encontramos os seguintes resultados:

$$\text{SAR 80 T: } R = \frac{132 - 103,95}{132} \times 100 = 21,25\%$$

$$\text{ABNT 1045: } R = \frac{321,74 - 67,24}{321,74} \times 100 = 79,10\%$$



O SAR 80 T apresentou valores muito menores de  $\sigma_{AS}$ , o que indica sua suscetibilidade à trinca de reaquecimento, o que realmente se verificou na prática.

Contudo, os parâmetros baseados apenas na composição química (item 1.4) contrariam este fato. Os parâmetros  $\Delta G$  e  $P_{SR}$  (Tabela 1.1), quando aplicados ao SAR 80 T nos dão como resultados valores menores que zero, o que significa que teoricamente o aço não seria suscetível à trinca de reaquecimento:

$$\begin{aligned}\Delta G &= Cr + 3,3Mo + 8,1V - 2 \\ \Delta G &= 0,55 + 3,3 \times 0,33 + 8,1 \times 0,028 - 2 \\ \Delta G &= 0,55 + 1,089 + 0,2268 - 2 \\ \Delta G &= -0,1342\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{SR} &= Cr + Cu + 2Mo + 10V + 7Nb + 5Ti - 2 \\ P_{SR} &= 0,55 + 0,27 + 2 \times 0,33 + 10 \times 0,028 + 7 \times 0,005 + 5 \times 0,016 - 2 \\ P_{SR} &= 0,55 + 0,27 + 0,66 + 0,28 + 0,035 + 0,08 - 2 \\ P_{SR} &= -0,125\end{aligned}$$

Isto contradiz os resultados obtidos experimentalmente. Esta contradição configura-se como mais um argumento contra o uso exclusivo dos parâmetros baseados apenas na composição química para a determinação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento.

É interessante citar que este aço teve sua composição química substancialmente alterada, como podemos comprovar pelo trabalho anterior de Ferraresi et al. [13], onde foi utilizado este mesmo aço, fornecido pelo mesmo fabricante, e onde os resultados de  $\Delta G$  e  $P_{SR}$  foram maiores do que zero. Neste trabalho o aço SAR 80 T foi identificado simplesmente como aço A [14]. Numa comparação entre os resultados alcançados pelos dois trabalhos, pode-se constatar que a alteração na composição química promovida pelo fabricante melhorou o desempenho do aço quanto à suscetibilidade à trinca de reaquecimento, porém esta melhora foi pouco significativa, sendo que o aço em questão ainda é altamente suscetível a este problema.

Os resultados dos testes de implante modificado realizados neste trabalho mostraram-se bastante coerentes com os resultados publicados na literatura [13], contudo é preciso enfatizar que os ensaios realizados foram sobremaneira facilitados pela automação de grande parte do processo de ensaio, liberando o operador da coleta de dados durante o ensaio e também permitindo uma maior precisão, uma vez que os dados obtidos pelo sistema de monitoramento estão livres de problemas tais como erros de leitura e de interpretação.

### 5.2.3- Testes de Repetibilidade

Com o objetivo de se avaliar o desempenho do equipamento repetiu-se o teste para valores de tensão para os quais o comportamento dos aços seria inequívoco. Para o SAR 80 T repetiu-se os testes para os valores de 165 MPa, onde sempre se verificou o rompimento dos corpos de prova, e 132 MPa, onde não se verificou rompimento. Para o ABNT 1045 selecionou-se arbitrariamente o valor de 321,74 MPa em função das dimensões do corpo de prova (780 Kgf), visto que o aço não apresentou trincas de reaquecimento. As figuras 5.8, 5.9 e 5.10 mostram algumas das curvas obtidas, sendo que na figura 5.8 pode se ver claramente que, quando o comportamento do aço não é ambíguo, ou seja, quando a carga está fora dos limites da faixa de incerteza, os resultados obtidos são extremamente coerentes, apresentando mínimas variações durante os testes. Pode-se observar também que a 165 MPa o trincamento ocorre quase que ao mesmo tempo que a temperatura de patamar é alcançada.

A figura 5.8 mostra também a curva do ciclo térmico, pela qual podemos ver que o rompimento do corpo de prova se dá logo após o corpo de prova atingir a temperatura de patamar de tratamento térmico.

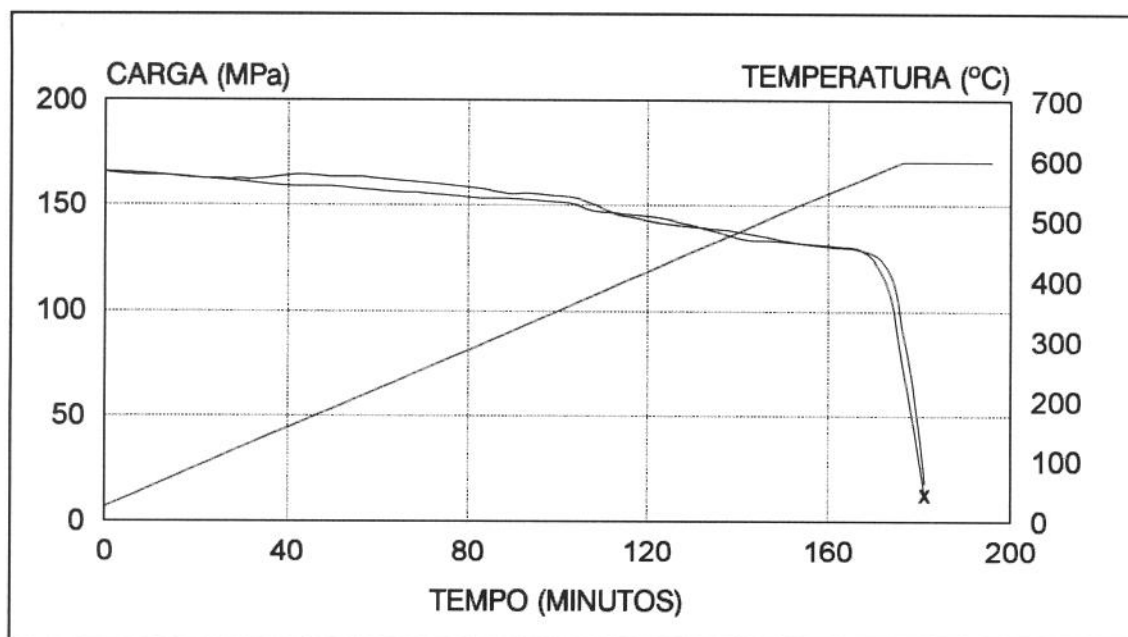


Figura 5.8- Curvas de Tensão versus Tempo para o SAR 80 T a 165 MPa.

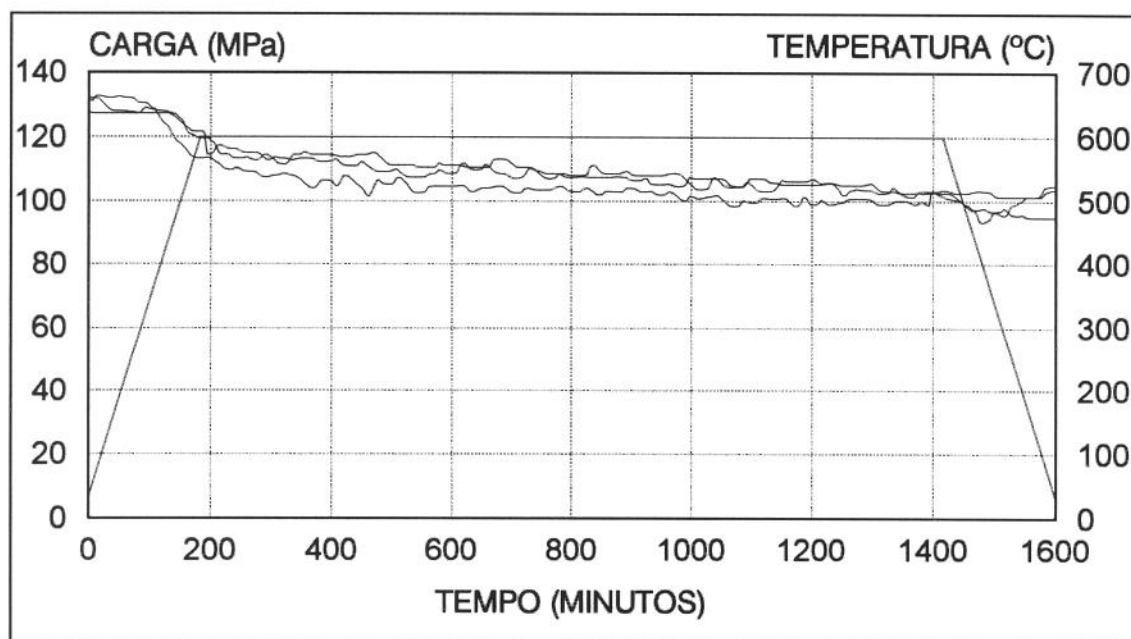


Figura 5.9- Curvas de Tensão versus Tempo para o SAR 80 T à 132 MPa.,

Na figura 5.9, além do aspecto coerente das curvas, que são aproximadamente paralelas durante todo o decorrer dos ensaios, vale a pena chamar a atenção para a interferência sofrida, durante os ensaios, no sistema de aquisição de dados. Tais interferências se refletem no aspecto das curvas e são devidas, em parte ao tipo de placa de aquisição de dados utilizada neste trabalho, que não conta com um sistema de supressão de ruídos, e em parte

ao software utilizado para a aquisição, onde optamos por utilizar ganho 100, ou seja, o sinal recebido era multiplicado por 100 e depois gravado para posterior processamento. Este ganho, um pouco elevado, se por um lado amplificava as interferências no sistema, por outro lado permitiu alcançar uma maior acuracidade no monitoramento, sendo que a interferência foi o preço a ser pago por este aumento de precisão.

A figura 5.10 mostra duas curvas de tensão versus tempo e uma curva do ciclo térmico de alívio de tensão aplicado no ensaio, obtidas com o teste de implante modificado aplicado ao ABNT 1045, onde podemos ver que as curvas obtidas são bastante parecidas, apresentando pequenas variações, o que, do ponto de vista da ordem de grandeza das cargas envolvidas, é desprezível.

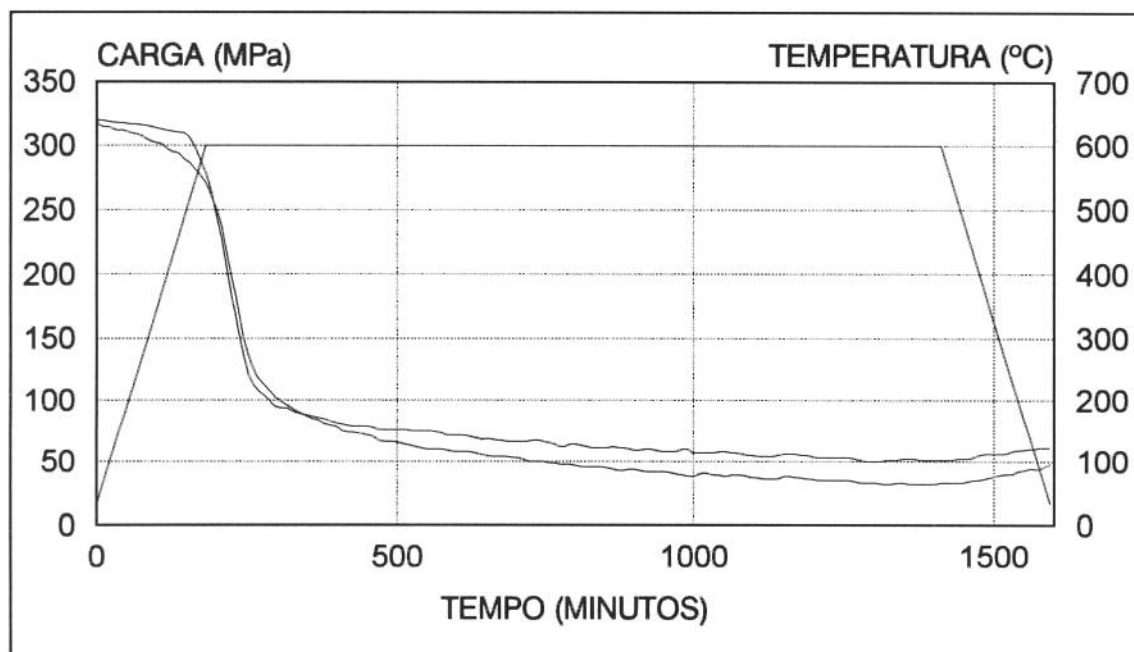


Figura 5.10- Curvas de Tensão versus Tempo para o ABNT 1045 a 321,74 MPa.

Como podemos ver pelas curvas apresentadas nas figuras o equipamento demonstrou um bom desempenho, permitindo a realização dos ensaios de maneira fácil e obtendo resultados muito próximos dos publicados em literatura, o que, do ponto de vista do projeto e construção do equipamento, é uma indicação de que o equipamento cumpre a função que se espera dele.

## 5.3- TESTES DO SISTEMA DE AQUECIMENTO

### 5.3.1- Teste de versatilidade do sistema

Com o objetivo de se demonstrar a versatilidade do sistema, programou-se um ciclo térmico com 2 velocidades diferentes de aquecimento, a primeira de 300 °C/hora e a segunda de 100 °C/hora, 2 temperaturas distintas de tratamento térmico, 300 °C e 500 °C, e uma velocidade de resfriamento, de 235 °C/hora. A figura 5.11 mostra o gráfico de temperatura versus tempo obtido.

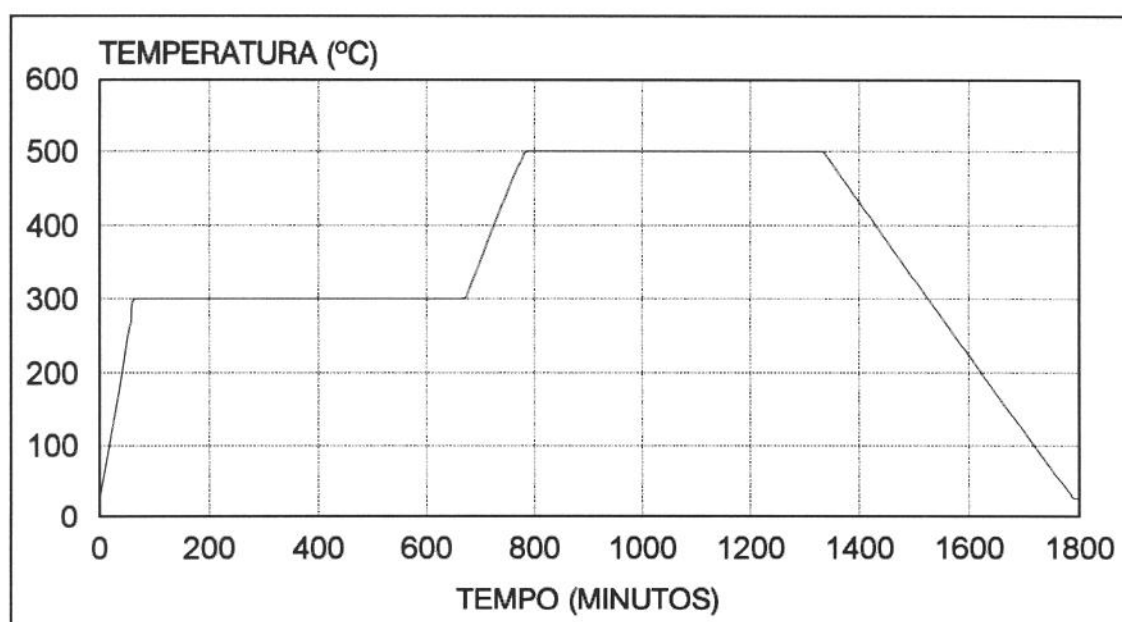


Figura 5.11- Curvas de temperatura versus tempo

Como pode-se ver na figura 5.11, o sistema de aquecimento demonstrou boa versatilidade, possibilitando uma grande liberdade de opções de tratamentos térmicos. É muito importante, num teste que envolve a variação de temperatura de um corpo de prova como é o caso do teste de implante modificado, que exista uma boa flexibilidade tanto na velocidade com que esta temperatura pode ser variada como nas temperaturas limites, máxima e mínima, que o sistema pode alcançar. Por esta razão dedicou-se muita atenção e despendeu-se muito tempo e esforço no projeto e construção de um forno de tratamento térmico que se adaptasse totalmente ao teste de implante modificado utilizado neste trabalho.

### 5.3.2- Teste de Avaliação da Potência do Sistema.

Com o objetivo de se determinar a máxima velocidade de aquecimento do forno, foi executado um teste onde o sistema de aquecimento operasse a 100 % de potência, fixando-se apenas a temperatura máxima que seria alcançada, que foi fixada em 600 °C, temperatura de ensaio utilizada neste trabalho. Para tanto, programou-se um "set-point" de 600 °C, sem fixação da velocidade de aquecimento. Com isso, o sistema liberou 100% de corrente para o circuito do forno, o que possibilitou avaliar a potência do equipamento. A figura 5.12 mostra a curva obtida.

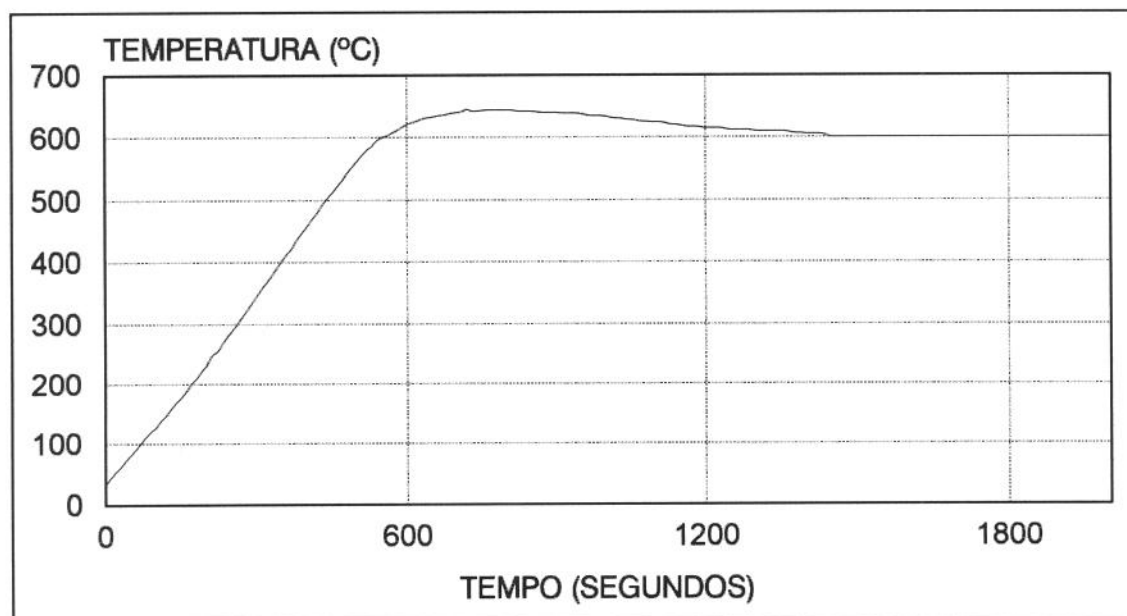


Figura 5.12- Curva de Temperatura versus Tempo para condição de máxima velocidade de aquecimento.

Com a realização deste experimento, determinou-se que a velocidade máxima de aquecimento do forno é de aproximadamente 1 °C/segundo, o que permite uma ampla gama de variações na velocidade de aquecimento, provando-se, desta maneira, a grande versatilidade do sistema de aquecimento. Note-se que a velocidade máxima de aquecimento do sistema

excede em muito as exigências dos testes executados, e esta reserva de potência aumenta a confiabilidade do sistema.

#### 5.4- AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA SOB A AÇÃO DOS ESFORÇOS

A rigor, este ensaio tem por objetivo garantir que eventuais repetições dos ensaios realizados ou mesmo a construção de uma réplica do equipamento para teste de implante modificado projetado neste trabalho por parte de outros pesquisadores alcance os mesmos resultados alcançados por nós.

A estrutura do equipamento de teste de implante modificado utilizado neste trabalho mostrou-se sensível à ação dos esforços atuantes no teste. O elemento estrutural que se mostrou mais suscetível a deformação foi a barra inferior do sistema de tração (figura 3.8). Por este motivo adotou-se um reforço estrutural com o objetivo de reduzir esta deformação (figura 4.9 ). Para se determinar a exata deformação desta barra sob a ação dos esforços atuantes no ensaio realizaram-se 10 medidas de deformação para 10 diferentes valores de tensão, de acordo com o procedimento detalhado no capítulo anterior (item 3.6). A tabela 5.2 mostra os valores obtidos:

Tabela 5.2- Valores de deformação da barra inferior do sistema de tração com a utilização do reforço estrutural

Carga (N)	Deformação (mm)	Carga (N)	Deformação (mm)
980	0,20	6.860	1,10
1.960	0,46	7.840	1,19
2.940	0,66	8.820	1,26
3.920	0,81	9.800	1,34
4.900	0,91	10.780	1,42
5.880	1,01		



A figura 5.13 mostra, de maneira gráfica, a curva obtida a partir dos valores expressos na tabela 5.2:

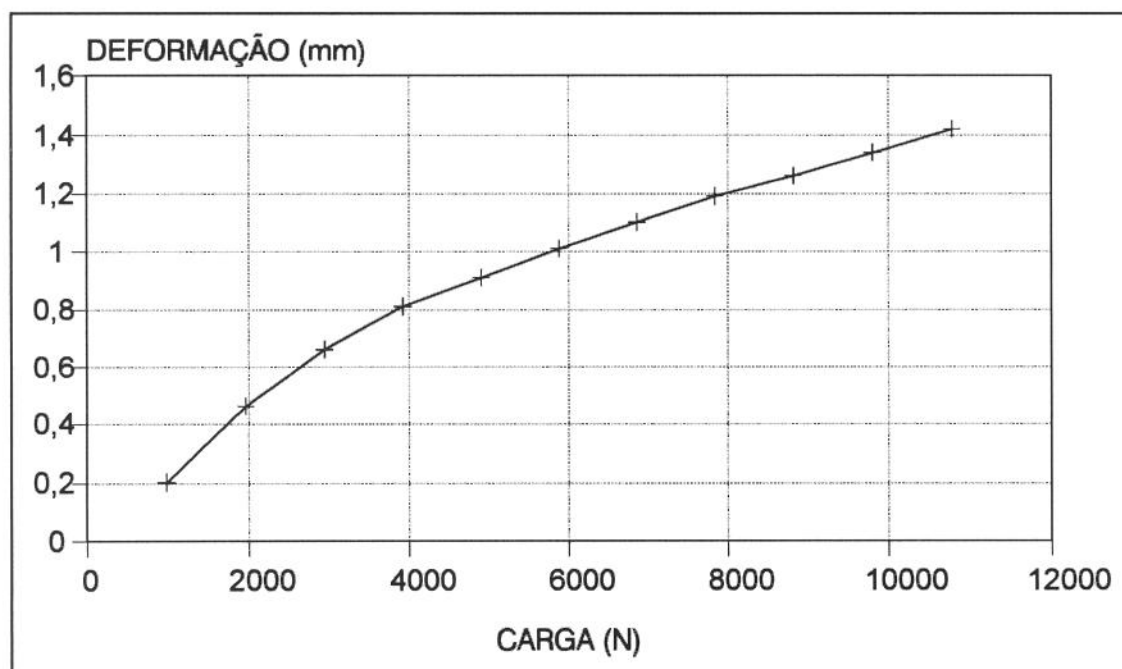


Figura 5.13- Curva de Tensão versus deformação da barra inferior com reforço estrutural.

Como pode-se constatar pela figura, a curva obtida não é uma curva típica de um material metálico submetido a um esforço situado dentro dos limites do regime elástico, onde esta deformação seria representada por uma reta ( $y=k.x$ ). No caso da barra inferior, onde se utilizou um reforço estrutural, acredita-se que a curva represente a deformação de duas molas agindo em conjunto, visto que os 3 primeiros pontos indicam uma tendência de reta com uma determinada inclinação, que se não é constante encontra-se bastante próxima, dando a entender que é a representação de uma única mola, no caso a barra inferior propriamente dita. Já nos últimos pontos, quando a solicitação é maior, indicam uma tendência de inclinação menor indicando que a barra tornou-se mais rígida e resistente à deformação. Esta mudança no comportamento da barra deve-se, provavelmente, à presença do reforço estrutural, que não atua, ou atua muito pouco para pequenas solicitações, visto que o reforço não é soldado à barra. Desta maneira, o que se observa é



que o reforço, quando solicitado adequadamente, ajusta-se à barra e, juntamente com ela, atua como um único elemento estrutural. Além disso, deve-se levar em conta que a barra em questão é um componente de uma estrutura e como tal, interage com esta. Dessa maneira, uma solicitação imposta à barra pode ter como consequências não apenas a deformação desta barra, mas também a deformação do restante da estrutura onde a barra está engastada.

É interessante também comparar os dados de deformação obtidos experimentalmente com aqueles calculados (item 3.2.3-b), quando se obteve um valor de deformação de 1,9 mm para uma carga de 4000 Kgf, enquanto que experimentalmente se obteve uma deformação de 1,4 mm para uma solicitação de 1100 Kgf (10.780 N). Considerando-se que a deformação teórica foi calculada para uma barra homogênea, isto é, sem furo, e também sem reforço, acreditamos que o dimensionamento alcançou seu objetivo de garantir que a estrutura suportasse os esforços sem deformação plástica.

## CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

1- Os resultados obtidos com os testes de trinca de reaquecimento e de trinca a frio realizados com o aço SAR 80 T permitem caracterizar as trincas ocorridas durante este trabalho como trincas de reaquecimento.

2- O aço SAR 80 T testado neste trabalho mostrou ter alta suscetibilidade à trinca de reaquecimento, mostrando-se suscetível a partir de níveis de tensão superiores à 132 MPa para o ciclo térmico de alívio de tensões adotado.

3- O equipamento projetado e construído neste trabalho revelou-se eficaz na determinação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento, principalmente por fornecer valores numéricos de tensões admissíveis e de relaxação que o material suportaria durante um tratamento térmico de alívio de tensões.

4- O equipamento mostrou-se versátil e de fácil operação, caracterizando-se como um equipamento de teste semi-automatizado e representando uma alternativa de teste que pode ser facilmente implementada por usuários que necessitem trabalhar com materiais soldados e posteriormente reaquecidos.

5- O equipamento apresentou um desempenho com boa repetibilidade e alta precisão, notadamente pelo uso da placa A/D, que garantiu a aquisição de dados a intervalos de tempo fixos e com leituras muito precisas.

6- O sistema de aquecimento projetado e construído neste trabalho mostrou-se capaz de implementar ciclos térmicos variados, possibilitando assim a variação de parâmetros que permitam uma melhor pesquisa da trinca de reaquecimento. Mostrou também possuir potência mais que suficiente para executar o teste com velocidades de aquecimento que podem variar desde 1 °C/hora até 3.600 °C/hora, o que acrescenta confiabilidade ao sistema.

7- A estrutura projetada e construída mostrou-se capaz de resistir aos esforços inerentes ao teste sem apresentar deformação plástica que possam interferir nos resultados.

8- O aço SAR 80 T mostrou um comportamento ambíguo quando testado em uma faixa de solitação entre 165 e 132 MPa, podendo apresentar ou não o rompimento do corpo de prova. Esta faixa de solitação foi chamada, neste trabalho, de faixa de incerteza do material. Este comportamento do material pode ser atribuído à uma não homogeneização microestrutural do material.

9- Os parâmetros para determinação da suscetibilidade à trinca de reaquecimento baseados apenas na composição química do material devem ser utilizados com cuidado, pois deixam de levar em conta fatores importantes tais como nível de tensão na junta e temperatura de reaquecimento.

## **CAPÍTULO 7: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Uma vez completado este trabalho, sugere-se que para melhor aproveitamento do mesmo o equipamento seja utilizado para a pesquisa do fenômeno da trinca de reaquecimento, podendo-se implementar alterações nas velocidades de aquecimento e resfriamento, patamares intermediários de tratamento térmico e períodos variáveis de ciclo térmico.

Sugere-se também uma análise econômica comparativa entre o teste de implante modificado e os demais testes de trinca de reaquecimento, uma vez que a literatura cita o teste de implante modificado como um teste de baixo custo financeiro, porém sem corroborar esta afirmação com dados práticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN WELDING SOCIETY. *Introductory Welding Metallurgy*. 3ª Edição, Miami: American Welding Society, 1979, página 129.
2. AMARAL, R., BUSCHINELLI, A.J.A. Fragilização e Soldabilidade do Aço Wste-36 (Nb). In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 7º, 1986, Florianópolis, SC. **Anais do 7º CBCIMAT**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1986. p 123-126.
3. BALAGUER, J.P., WANG, Z., NIPPES, E.F. Stress Relief Cracking of a Copper-Containing HSLA Steel. *Welding Journal*, p 121s-131s, Abril de 1989.
4. BARRERA, E.V., MENYHARD, M., BIKA, D., ROTHMAN, B., MCMAHON Jr, C.J. Quasi-Static Intergranular Cracking in a Cu-Sn Alloy; an Analog of Stress Relief Cracking of Steels. *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol. 27, nº 2, p 205-210, 1992.
5. BILLA, R. **Avaliação da Suscetibilidade a Trincas de Reaquecimento em Juntas Soldadas do Aço Wste 51**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1983. 110 páginas. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).
6. BONISZEWSKI, T. Metallurgical Aspects of Reheat Cracking of Weldments in Ferritic Steels. *Welding Journal*, Vol. 51, nº 29, 1972.
7. CARBORUNDUM DO BRASIL S/A. **Fiberfrax- Especificações do Produto- Placa Duraboard 1200**. Catálogo Técnico.
8. CASSANELI, A.N., MEJÍAS, H.D., DE VEDIA, L.A. Fragilization del Revenido en Metal de Aceros 2.25 Cr-1Mo. **Boletim Técnico Conarco**, nº 92, p 25-28, Maio de 1989.
9. CHILQUE, A.R.A. Uma Introdução ao Problema da Fissuração Durante o Tratamento Térmico de Alívio de Tensões de Estruturas Soldadas em Aço Baixa Liga. In: I CONGRESSO LATINO-AMERICANO E I ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, Setembro de 1975, Rio de Janeiro: **Anais da ABM**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Metalurgia, 1975, p 161-194.

- 10.DHOOGE, A., VINCKIER, A. Study of the Phenomenon of Cracking During Stress Relief Heat Treatments in Welded Joints of Quenched and Tempered High Strength Steels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, 12<sup>o</sup>, 1993, Glasgow, Scotland. **Proceedings of the 12th International Conference on OMAE** 1993, Volume III- Part B: Materials Engineering. Nova Iorque: Publicado pela ASME, 1993. p 631-643.
- 11.DHOOGE, A., VINCKIER, A. Reheat cracking - A review of recent studies. **Welding in the World**. vol. 24, n<sup>o</sup>.5/6, p.104-126, 1986.
- 12.EASTERLING, K. **Introduction to the Physical Metallurgy of Welding**. 1<sup>a</sup> Edição. Londres: Butterworths & Co (Publishers) Ltd, 1983. p 194-221.
- 13.FERRARESI, V.A., GONÇALVES, R.A., SCOTTI, A. Avaliação da Susceptibilidade à Trincas de Alívio de Tensões em Aços Estruturais de Baixo Cr e Mo. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 19<sup>o</sup>, 1993, Águas de São Pedro,. SP. **ANAIS DO XIX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1993. p 87-96.
- 14.FERRARESI, V. **Conversas particulares**. 1993-1995.
- 15.GODOY, A.F. **Estudo da Suscetibilidade à Trinca a Frio em Juntas Soldadas de Aço SAR 80 BT**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1989. 112 páginas. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica).
- 16.HIPPSLEY, C.A., BUTTLE, D.J., SCRUBY, C.B. A study of the dynamics of high temperature brittle intergranular fracture by acoustic emission. **Acta Metallurgica**, vol. 36, n.2, p.441-452, 1988.
- 17.HIPPSLEY, C.A., KNOTT, J.F., EDWARDS, B.C. A study of stress relief cracking in 2,25Cr-1Mo steel - I. The effects of P segregation. **Acta Metallurgica**, v.28, p.869-885, 1980.
- 18.HOLMAN, J.P. **Transferência de Calor**. 1<sup>a</sup> Edição. São Paulo: Editora McGraw Hill do Brasil Ltda., 1983, Capítulo 2: Condução Unidimensional em Regime permanente, p 25-64.

- 19.HRIVŇÁK, I., YUSHCHENKO, K.A. Principles of Mechanical Stress-Relief Treatment. In: STRESS RELIEVING HEAT TREATMENTS OF WELDED STEEL CONSTRUCTIONS, july 1987, Sofia, Bulgária. **Proccedings of the International Conference. held in** Sofia, Bulgária. Pergamon press/IIW, p.13-28, 1987.
- 20.KANTHAL BRASIL LTDA. **Kanthal® A-1- Liga Ferrítica para Condutores Caloríficos**. Folha de dados 1.01.1. Catálogo Técnico.
- 21.KOU, S. **Welding Metallurgy**. John Wiley & Sons, 1987. p 306-318, 351-354.
- 22.KRIVANDIN, V.A., MARKOV, B.L. **Metallurgical Furnaces**, Parte 6, Capítulo 2- Resistant furnaces. 2ª Edição. Moscou: Editora Mir, 1980, p 450-469.
- 23.MARTINS, F., ROVIRA, M.M. Monitoramento do Processo de Soldagem via Emissão Acústica. **Trabalho não Publicado**. Disciplina: Tópicos da Usinagem dos Metais. Departamento de Engenharia de Fabricação, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1994, 23 páginas.
- 24.McCULLOUGH, C., BAKER, A.J., The Role of Grain Boundary Migration in Reheat Cracking. **Acta Metallurgica et Materialia**, vol. 39, nº 12, p 3217-3225, 1991.
- 25.McMAHON JR, C.J., DOBBS, R.J., GENTNER, D.H. Stress relief cracking in MnMoNi and MnMoNiCr pressure vessel steels. **Materials Science and Engineering**, vol.37, p.179-186, 1979.
- 26.MEITZNER, C.F., PENSE, A.W. Stress Relief Cracking in Low Alloy Steel Weldments. **Welding Journal**, Vol. 48, nº 10, p 431s-440-s, Outubro de 1969.
- 27.MISRA, R.D.K., RAMA RAO, P. Grain Boundary Migration in Reheat Cracking. **ACTA METALLURGICA ET MATERIALIA**, Volume 40, nº 6, p 1223-1228, 1992.
- 28.MYERS, J., CLARK, J.N. Influence of Welding Procedure on Stress Relief Cracking in Cr-Mo-V Steels: Part 1- Use of Cross Weld Specimens. Part 2-



- Repair Evaluation in Cr-Mo-V Steels. **Metals Technology**, vol 8, part 10, p 382-394, Outubro de 1981.
- 29.NAKAMURA, M., KIKUCHI, Y. Characterization of microstructures and precipitated carbides in HAZ which affect the reheat cracking susceptibility of high tensile steel welds. **Transactions of the Japan Welding Society**, v.22, n.2,p.24-29, oct.1991.
- 30.NAKAMURA, M., ENJO, T., KIKUCHI, Y. Influence of microstructure in the heat-affected-zone on the reheat cracking susceptibility. **Transactions of the Japan Welding Society**, v.18, n.2, p.51-57, Outubro 1987.
- 31.Nippes, E.F., Savage, W.F., Bastian, B.J., Mason, H.F., Curran, R.M. An investigation of the Hot Ductility of High Temperature Alloys. **Welding Journal**, Vol 34, p 183s-196s. 1955.
- 32.OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos editora S/A, 1982. p 153-178.
- 33.SANDVICK DO BRASIL S/A. **Fios e Fitas para Resistências Elétricas**. Catálogo Técnico.
- 34.SCIFO, A. Fenomeni di fragilizzazione e valutazione della vita residua per gli acciai al. cromo-molibdeno - parte 1. **Rivista Italiana Della Soldatura**, anno XLI, n.3, p.205-216, maggio-giugno 1989.
- 35.SCOTTI, A. **Relatório Técnico-Dispositivos Para Testes de Trincas a Frio e a Quente em Soldas**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia,Departamento de Engenharia Mecânica, 1987.
- 36.SHIGLEY, J.E. **Elementos de Máquinas**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 1988. , Apêndice, p 301-339.
- 37.SILVA, C.L.F., MORAES, M.M., GUIMARÃES, A.S. Revestimento Austenítico tipo 347 em Aços de Especificação HY 80. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM, 19, 1993, Águas de São Pedro, SP. **Anais do XIX Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1993, p 65-85.
- 38.SOUZA,S.A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**.1ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1974. p 83-95.

- 39.STASI, L.d. **Fornos Elétricos**. São Paulo: Hemus Livraria Editora Ltda., 1981, p 305-369.
- 40.TAMAKI, K., SUZUKI, J. Reheat Cracking Test on High Strength Steels by a Modified Implant Test.( Study of Reheat cracking of Cr-Mo Steels, Report 1) **Transaction of the Japan Welding Society**, v.14 n.2, p.25-30, October 1983.
- 41.THAMBURAJ, R., WALLACE, W., GOLDAK, J.A. Post-Weld Heat-treatment Cracking in Superalloys. International Metals Reviews, vol 28, nº 1, p 1-22, 1983.
- 42.Usiminas- Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A. Dados Fornecidos por carta e fax. 1995.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

1. American Welding Society. Recommended Practices for Welding of Chromium- Molybdenum Steel Piping and Tubing. 3ª Edição, Miami: American Welding Society, 1985, 16 páginas.
2. Apblett, Jr.W.R., bagnoli, D., Ciuffreda, A.R., Lundin, C., Prager,M. Prevention and Repair of Cracking in Chrome-Moly Equipment. Final Report to API.USA, 161 páginas, Setembro de 1990.
3. Batte, A.D., Murphy, M.C. Reheat Cracking in 2.25 Cr-Mo Weld Metal Influence of Residual Elements And Microstructure. **Metals Technology**, p- 62-68, Fevereiro de 1979.
4. França, J.L. **Manual para Normalização de Publicações Técnico-Científicas**. 2ª Edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1992, 196 páginas.
5. Maria, C.R., Guimarães, A.S., Rebello, J.M.A., Rios, P.R. Instrumentação de Equipamentos para Teste de Implante. In: Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem, 13º, 1987, Guarujá, S.P. **Anais do XIII Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem**. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1987, p 401-415.
6. Olefjord, I. Temper embrittlement. **International Metals Reviews**, Vol 23, nº 4, p 149-163, 1978.
7. Purazrang, K.Fracture Mechanics Testing Method for Assessing Susceptibility to Stress-Relief Cracking. **Welding Journal**, p 83s-87s, Março de 1976.
8. Ritter, J.C., McPherson, R. Embrittlement of the Weld Heat-Affected Zone in a Mn-Cr-Mo-V Steel. **Metals Technology**, Vol 1, Parte 2, p 506-511, Novembro de 1974.
9. Seabra, A.L.F., Assunção, F.C.R. Efeito do Ciclo Térmico na Microestrutura da Zona Afetada Pelo Calor (ZAC) de um Aço ARBL Temperado e Revenido. In: Congresso Anual da ABM, 45º, 1990, Rio de Janeiro. **Anais do 45º Congresso Anual da ABM**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, 1990, p 129-146.

10. Woodford, D.A. Test Methods for Accelerated Development, Design and Life Assessment of High-Temperature Materials. **Materials & Design**, vol 14, nº 4, p 231-242, 1993.
11. Yu, J., McMahon, Jr. C.J. The Effects of Composition and Carbide Precipitation on Temper Embrittlement of 2.25 Cr-1 Mo Steel. Part 1- Effects of P and Sn; Part 2- Effects of Mn and Si. **Metallurgical Transactions A**, Vol 11 A, p 277-300, Fevereiro de 1980.