

EGBERTO PEDRO DA SILVA
=====

INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA MICROESTRUTURA NA
FORMAÇÃO DE TRINCAS INDUZIDAS PELO HIDROGÊNIO
NO METAL DE SOLDA.

Dissertação apresentada ao
curso de pós-graduação em
engenharia mecânica da
Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do
Grau de Mestre.

Área de Concentração: PROJETOS DE PRODUTOS MECÂNICOS.

O R I E N T A D O R: PROF. DR. CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI

CO-ORIENTADORES: PROF. DR. NELSON GUEDES DE ALCANTARA

PROF. DR. MARCO ANTONIO DOS SANTOS.

C A M P I N A G R A N D E

M A R Ç O - 1 9 9 2

INFLUENCIA DA UMIDADE E DA
MICROESTRUTURA NA FORMAÇÃO DE
TRINCAS INDUZIDAS PELO HIDROGENIO
NO METAL DE SOLDA

100000
100000
100000

1. Origem da hidrogenação
2. Trincas induzidas pelo hidrogenio - mecanismo
3. Metal de solda - hidrogenio -
4. O efeito da hidrogenação sobre
5. eletrolitos AVO e 10013
6. fragmento de metal de solda



DEDICATÓRIA

À

Olival, Alice e meus
irmãos



S586i Silva, Egberto Pedro da
Influencia da umidade e da microestrutura na formacao de
trincas induzidas pelo hidrogenio no metal de solda /
Egberto Pedro da Silva. - Campina Grande, 1992.
76 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Mecanica) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

1. Engenharia Mecanica 2. Umidade - 3. Metal de Solda -
4. Eletrodos AWS e 8018 5. Eletrodos AWS e 10018 6.
Projetos de Produtos Mecanicos 7. Dissertacao I. Kiminami,
Claudio Shyinti, Dr. II. Alcantara, Nelson Guedes de, Dr.
III. Santos, Marco Antonio dos, Dr. IV. Universidade
Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) V. Título

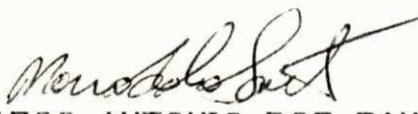
CDU 621(043)

INFLUENCIA DA UMIDADE E DA MICROESTRUTURA NA FORMAÇÃO DE TRINCAS
INDUZIDAS PELO HIDROGÊNIO NO METAL DE SOLDA.

EGBERTO PEDRO DA SILVA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 11 DE MARÇO DE 1992


PROF. DR. CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI
ORIENTADOR


PROF. DR. MARCO ANTONIO DOS SANTOS
CO-ORIENTADOR


PROF. DR. SEVERINO JACKSON GUEDES DE LIMA
EXAMINADOR

CAMPINA GRANDE, 11 DE MARÇO DE 1992

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Dr. CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI, pela sua extraordinária capacidade como orientador, indispensável à realização deste trabalho.

- Aos professores Dr. NELSON GUEDES DE ALCANTARA (UFSCar) e D. Sc. MARCO ANTONIO DOS SANTOS (UFPb), co-orientadores deste trabalho.

- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, que possibilitou a execução deste trabalho.

- À Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA) pela gentil doação das chapas para utilização no ensaio TEKKEN como metal base.

- À NICROSOL - Ind. e Com. de Soldas Especiais Ltda. ESAB - Eletro Solda Autógena Industrial S/A . e ARCOS - Solda Elétrica Autógena S/A pela doação dos eletrodos utilizados nos ensaios.

- Aos professores MANASSÉS C. A. MELLO e JOÃO BAPTISTA C. A. MELLO pela solidariedade e atenção sempre que solicitados.

- Ao amigo MANOEL LIMA DA SILVA pela sua indispensável cooperação durante a realização dos experimentos.

- Ao Funcionário FERNANDO JOSÉ DA SILVA pela cooperação quando da realização dos experimentos.

ABREVIATURAS E SIMBOLOS

AF	- Ferrita Acicular	
ASTM	- American Society for Testing Materials	
AWS	- American Welding Society	
OC	- Grau Centigrado	
Cb	- Somatório das relações entre a profundidade das trincas e altura do metal de solda	(%)
CE	- Carbono equivalente	
Cf	- Constante de fusão	(g/A.seg)
Cr	- Somatório das relações entre o comprimento das trincas de raiz e o comprimento do metal de solda	(%)
Cs	- Somatório das relações entre o comprimento das trincas de superfície e o comprimento do metal de solda	(%)
CMT	- Coeficiente médio de trincas	(1/mm)
e	- Espessura	(mm)
f	- Eficiência de transferência de calor	
FS	- Ferrita de Segunda Fase	
FS(A)	- Ferrita de Segunda Fase Alinhada	
FS(NA)	- Ferrita de Segunda Fase Não-Alinhada	
H	- Altura do metal de solda	(mm)
Hc	- Profundidade da trinca	(mm)
Hi	- Aporte de calor	(kJ/mm)
Hd	- Volume de hidrogênio difusível	(ml/100g)
Hmax	- Dureza máxima de Suzuki	
I	- Corrente em ampere	(A)
IMT	- Índice médio de trincas	(%)

K	-	Grau Kelvin	
M	-	Martensita	
Pcm	-	Carbono equivalente de Ito-Bessyo	
PF	-	Ferrita Primária	
PF(G)	-	Ferrita Primária de Contorno de Grão	
PF(I)	-	Ferrita Primária Intergranular	
Pw	-	Parâmetro de Ito-Bessyo	
Rf	-	Intensidade de vínculo estrutural	(Kjf/mm.mm)
Tf	-	Tempo de fusão	(seg)
To	-	Temperatura de pré-aquecimento	(°C)
v	-	Velocidade de soldagem	(mm/seg)
V	-	Tensão elétrica em volts	(V)
ZTA	-	Zona termicamente afetada	

RELAÇÃO DE TABELAS

	PAG
2.1 - Exemplo de composição química do revestimento básico.	- 23
3.1 - Composição química percentual em peso do metal base e de adição.	- 47
3.2 - Dados geral do metal de base e de adição.	- 47
4.1 - Resultado do ensaio de umidade contida no revestimento dos eletrodos AWS E 8018 e E 10018 após ressecagem a uma temperatura de 673K (400°C) por 2 horas.	- 57
4.2 - Dados meteorológicos do município de Campina Grande-PB.	- 58
4.3 - Mapa de ensaio (eletrodo AWS E 8018).	- 59
4.4 - Mapa de ensaio (eletrodo AWS E 10018).	- 60

RELAÇÃO DE FIGURAS

		PAG
2.1	- Influência do tempo de ressecagem sobre a umidade absorvida a 301K (28°C) 2.70% de umidade relativa. A temperatura de ressecagem foi de 692K (420°C)	- 24
2.2	- Esquema do equipamento para determinação da umidade de revestimento.	- 25
2.3	- Efeito da temperatura na fragilização por hidrogênio.	- 26
2.4	- Corpo de prova para ensaio de avaliação das trincas a frio, de auto restrição TEKKEK.	- 27
2.5	- Índice de trincas no metal de solda.	- 28
2.6	- Seleção das secções do cordão de solda para análise.	- 29
2.7	- Corte para isolamento da parte central do corpo de prova.	- 30
2.8	- Mapa com percentuais estimados do índice de trincas.	- 31
2.9	- Diagrama de eficiência térmica para tempo de resfriamento entre 1.073 e 773K (800 a 500°C) em função das condições de soldagem.	- 32
2.10	- Curva típica de dureza para aços C-Mn..	- 33
2.11	- Diagramas para previsão de formação de trincas a frio, considerando energia de soldagem e teor de hidrogênio difusível..	- 34
3.1	- Equipamento para determinação da umidade de revestimento .	- 48
3.2	- Gabarito para nivelamento do corpo de prova durante a aplicação da solda de revestimento.	- 49
3.3	- Equipamento para solda a arco-elétrico. Esquema para cálculo da correção da corrente, tensão e tempo de soldagem.	- 50
3.4	- Exemplo de cálculo de amperagem e tempo de soldagem, utilizando-se aparelho Registrador Gráfico Potenciométrico.	- 51

4.1	- Gráfico da umidade total por exposição ao ar livre.	- 62
4.2	- Efeito da temperatura sobre a umidade total (eletrodo AWS E 8018).	- 63
4.3	- Efeito da temperatura sobre a umidade total (eletrodo AWS E 10018).	- 64
4.4	- Efeito da umidade relativa sobre a umidade total (eletrodo AWS E 8018).	- 65
4.5	- Efeito da umidade relativa sobre a umidade total (eletrodo AWS E 10018).	- 66
4.6	- Ensáio TEKKEN - verificação de trincas (eletrodos AWS E 8018)	- 67
4.7	- Ensáio TEKKEN - verificação de trincas (eletrodos AWS E 10018).	- 68
4.8	- Seção transversal do metal de solda com trinca a frio causada por hidrogênio .	- 69
4.9	- Microestrutura do metal de solda.	- 70

Neste trabalho avaliou-se o teor de umidade contido no revestimento dos eletrodos AWS E 8018 e AWS E 10018 na condição de ressecado e, quando expostos às condições ambientais e condições controladas de temperatura e umidade relativa. Os resultados demonstram a grande sensibilidade da taxa de absorção de umidade, com alteração na temperatura e/ou umidade relativa sendo que, os níveis máximos estabelecidos pelas normas são atingidos em poucas horas de exposição a condições normais do ambiente. Para avaliação da influência da umidade assim adquirida, no aparecimento de trincas a frio induzidas pelo hidrogênio no metal de solda, ensaios TEKKEK, com chanfro em Y simétrico, foram realizados com chapas de aço ASTM - A 516 - gr 65. O teor de umidade total variou de 0.19% até 3.04%, e a energia de 0.74 kJ/mm a 2.27 kJ/mm. Não se verificou o aparecimento de trincas com o eletrodo AWS E 8018 que apresentou um grande percentual de ferrita acicular. Com o AWS E 10018, as trincas surgiram quando condições críticas de umidade total e aporte de calor foram utilizados. Um nível mínimo de energia em torno de 1.6 kJ/mm foi necessário para se evitar trincas, mesmo com eletrodos ressecados. Nessas amostras o percentual de ferrita acicular não foi tão grande, entretanto uma quantidade significativa de ferrita primária formou-se.

Humidity content in redried AWS 8018 and AWS E 10018 electrodes was evaluated when exposed to controlled humidity and temperature. The results showed great sensibility of the humidity absorption on the covering when temperature and humidity were changed. To study influence of this humidity in hydrogen induced cracking, it was used Y groove TEKKE test in ASTM - A 516 g65 steel. The humidity content ranged from 0.19% to 3.04% with heat input variations from 0.84 kJ/mm to 2.27 kJ/mm. It was not found any crack when the specimen were welded with AWS E 8018, which showed mainly acicular ferrite as a microstructure, but when welded with E 10018 eletrodes cracks were observed with humidity and low heat input. In second case the minimum heat input to avoid cracks was 1.6 kJ/mm. Also it observed some amount of primary ferrite microstructure in E 10018 deposits, the less amount of acicular ferrite than E 8018 deposits.

INDICE

	PAG
Capítulo - 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	
1.1 - Introdução	- 01
1.2 - Objetivos	- 03
Capítulo - 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 - Considerações Iniciais	- 04
2.2 - Eletrodos Básicos	- 05
2.2.1 - Revestimentos	- 05
2.2.2 - Umidade do Revestimentos Básico	- 06
2.2.3 - Ressecagem	- 07
2.2.4 - Ensaios de Determinação de Umidade	- 08
2.3 - Trincas a Frio Causadas por Hidrogênio	- 09
2.3.1 - Fatores que Afetam a Formação das Trincas.	- 09
2.3.2 - Morfologia e Tipos de Trincas	- 14
2.3.3 - Ensaios de Soldabilidade	- 15
2.3.4 - Procedimentos de Soldagem para Evitar Trincas a Frio.	- 17
Tabelas e figuras do capítulo 2	- 22
Capítulo - 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	
3.1 - Absorção de Umidade	- 35
3.1.1 - Materiais e Equipamentos	- 35
3.1.2 - Métodos	- 36

3.2 - Trincas a Frio Causadas pelo Hidrogênio	- 41
3.2.1 - Materiais e Equipamentos	- 41
3.2.2 - Métodos	- 42
3.3 - Análise Metalográfica	- 44
3.3.1 - Materiais e Equipamentos	- 44
3.3.2 - Métodos	- 44
Tabelas e figuras do capítulo 3	- 46
 Capítulo - 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	
4.1 - Umidade Contida no Revestimento dos Eletrodos.	- 52
4.2 - Absorção de Umidade.	- 52
4.2.1 - Absorção de Umidade por Exposição ao Ar Livre	- 52
4.2.2 - Umidade Absorvida em Câmara Climatizada	- 53
4.3 - Trincas a Frio Causadas por Hidrogênio	- 54
4.4 - Análise Quantitativa da Microestrutura	- 55
Tabelas e figuras do capítulo 4	- 57
 Capítulo - 5 - CONCLUSÕES	- 71
 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.	- 73
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 74

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 - INTRODUÇÃO

Existe um interesse cada vez maior na otimização econômica dos processos de soldagem, observando-se a cada dia uma maior atenção a todos os fatores que interferem nos custos e na qualidade final de uma junta soldada. /1/.

Os eletrodos quando fabricados passam por um processo de secagem com a finalidade de reduzir a umidade contida em seus revestimentos. Depois, por higroscopicidade, eles absorvem umidade de forma gradual até alcançarem um equilíbrio de acordo com as condições atmosféricas do ambiente onde estão acondicionados. Em se tratando de eletrodos básicos, faz-se necessários que o nível desta umidade seja mantido abaixo de um limite, para que o seu desempenho, quando da soldagem, seja normal. Qualquer forma de absorção que possa provocar excesso de umidade no revestimento desses eletrodos pode causar o aparecimento de defeitos como: porosidade no metal de solda, salpicos excessivos, instabilidade do arco, má conformação do cordão de solda ou ainda fissuração por hidrogênio. Este último é considerado o mais importante, pois, em todo mundo as indústrias gastam bilhões de dólares anualmente para resolver problemas de produtos soldados, donde 20% destes são devidos a trincas a frio, causadas por hidrogênio na junta soldada /2/.

A norma AWS A 5.1-81 /3/, estabelece condições de estocagem em ambiente normal para eletrodos básicos, como por exemplo: para o AWS E 7018, de $300K \pm 11K$ [$27 C \pm 11^{\circ}C$] a uma umidade relativa máxima de 50%. Na Região Nordeste, onde a umidade relativa anual média é de 78% /4/, esta norma não pode ser aplicada. Com este alto índice, o que mais tem concorrido para a umidificação dos eletrodos e a conseqüente má qualidade dos trabalhos de soldagem realizados nas oficinas da região é a inobservância por parte dos usuários das condições ideais de estocagem após a abertura da embalagem original que, depois de ressecados, é recomendado o seu armazenamento em estufas apropriadas. Entretanto, frequentemente, nas lojas de vendas e nas pequenas oficinas de manutenção e recuperação da região, os consumíveis permanecem expostos por falta de conhecimento ou por simples negligência. Estudo recente /1/, realizado na região de Campina Grande - Pb, utilizando eletrodos AWS 7018 e AWS E 11018, mostrou que estes eletrodos absorvem rapidamente umidade quando expostos a condições ambientais sob temperaturas médias de 296K (23°C) e umidade

relativa média de 86% . Os níveis de umidade atingidos foram superiores a 2,5% após 35 dias de exposição.

Para avaliar a influência de alguns fatores predominantes na fissuração de juntas soldadas, foram desenvolvidos vários ensaios de soldabilidade. Dentre eles, o ensaio TEKKEN é o mais usado para avaliar a influência do teor de hidrogênio, microestrutura e temperatura nas trincas induzidas pelo hidrogênio, tanto no metal de solda como na zona termicamente afetada. Gráficos, fórmulas e tabelas também foram desenvolvidos com a finalidade de prevenir defeitos na junta soldada. Porém, devido ao grande número de parâmetros envolvidos nos processos de soldagem como também a vasta variedade de aços fabricados, fica difícil a aplicação generalizada dos resultados desses estudos.

1.2 - OBJETIVOS

- Avaliar o teor de umidade nos revestimentos dos eletrodos básicos AWS E 8018 e E 10018, quando expostos a condições ambientais e condições controladas de temperatura e umidade relativa.

- Avaliar a influência do teor de umidade dos revestimentos dos eletrodos básicos AWS E 8018 e AWS E 10018 e da microestrutura no aparecimento de trincas a frio no metal de solda através, de ensaio de auto-restrição em chapas ASTM A 516 gr 65 com variação de aporte de calor.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização da soldagem na produção industrial trouxe baixo custo, simplicidade e produtividade à indústria moderna. Aliados a estas vantagens, vieram também os problemas inerentes ao controle de qualidade no processo. Dentre os diversos processos de soldagem, destaca-se a solda a arco elétrico com eletrodo revestido pelo seu baixo custo e versatilidade. Ao realizar-se uma solda elétrica com eletrodo revestido, é frequente a presença de um elemento que exerce significativa influência na soldabilidade dos aços, causando defeitos, principalmente de trincas a frio; trata-se do hidrogênio /2/. Este elemento altamente solúvel em aço, quando em estado líquido, é dificilmente eliminado da poça de fusão à medida em que a velocidade de resfriamento aumenta. Uma vez retido exercerá ação danosa, sobretudo formando pressões internas causadoras de trincas a frio após a soldagem.

O hidrogênio é gerado na poça de fusão nas seguintes situações /5/:

- Umidade do ar absorvido pelo revestimento;
- Vapor d'água oriundo da combustão de materiais orgânicos contidos em tintas, óleos, graxas, etc.
- Películas de óxidos dos arames de adição ou do próprio metal base;
- Na composição do próprio aço, como solução sólida de hidrogênio monoatômico ou como inclusões na forma molecular;
- Na água de cristalização dos constituintes de revestimentos.

Durante o procedimento de soldagem, outros fatores influem no aparecimento de trincas a frio devido ao Hidrogênio nas juntas soldadas: corrente de soldagem, temperatura de pré-aquecimento, velocidade de soldagem, taxa de resfriamento e variação da pressão parcial de hidrogênio. Embora todos esses fatores sejam importantes, a higroscopicidade dos consumíveis assume papel relevante em se tratando de eletrodo básico, pelo

seu caráter altamente higroscópico de seus revestimento.

2.2 - ELETRODOS BASICOS

Estes eletrodos são também denominados de baixo hidrogênio, pois proporcionam um metal depositado com baixo teor daquele elemento. O metal depositado apresenta assim uma baixa sensibilidade ao trincamento. Em função desta característica, a junta soldada exibe excelentes propriedades mecânicas, apresentando boa ductilidade e tenacidade. Entretanto, o arco gerado pelos eletrodos básicos é relativamente instável e as gotas que se transferem ao metal-base são ligeiramente maiores do que as dos outros eletrodos. Isso faz com que sua manipulação exija um treinamento prévio por parte do soldador, para que este se familiarize bem com este tipo de eletrodo. Estes eletrodos são empregados na confecção de juntas de alta responsabilidade, principalmente naquelas estruturas constituídas de chapas grossas, como no caso de vasos de pressão, caldeiras e outros produtos similares.

A classificação AWS A 5.1 e A 5.5 para eletrodos básicos é a mais usada internacionalmente, dentre as várias existentes, adotadas pelas entidades competentes dos diversos países. Esta classificação consiste em :

E - XXX YZ - S

Onde E significa eletrodo; XXX a resistência mecânica do metal em ksi; Y a posição; Z o tipo de corrente, penetração e tipo de revestimento e S a composição química do metal de solda. Eletrodos básicos são caracterizados pela terminação 5, 6 e 8 da sua classificação.

2.2.1 - Revestimento

O revestimento de um eletrodo consiste em uma mistura de certos ingredientes combinados em proporções adequadas. Cada ingrediente que entra na composição tem uma ou mais funções bem determinadas. As principais funções do revestimento são as seguintes /6/:

a) estabilizar o arco e promover a transferência das gotas de material fundente de modo estável;

- b) promover a formação da escória e de gases para proteger a poça de fusão e auxiliar o refino do metal depositado;
- c) adicionar elementos de liga ao metal depositado nos casos necessários.

O revestimento é geralmente extrudado em um arame ("alma"), sendo necessário que aquele possua certas características para que possam ser alcançadas altas velocidades de fabricação /1/.

A "alma" é, na maioria dos casos, para eletrodos de aços ao carbono e baixa liga, constituída de um aço efervescente de baixo carbono. Desoxidantes, tais como alumínio e silício, quando contidos na "alma" tendem a desestabilizar o arco, além do que, este aço solidifica com um anel externo de ferrita quase pura, estando as impurezas concentradas no centro, tornando-o ideal para trefilação. As microporosidades típicas destes aços, aparentemente, auxiliam a transferência de metal do eletrodo.

O modo de transferência de metal, desde eletrodo, é fortemente influenciado pelo tipo de revestimento. Com a atmosfera redutora formada pelos revestimentos básicos, gotas de grande tamanho são transferidas. O revestimento básico induz à transferência por gotas, depositando um metal de solda desoxidado e de baixo hidrogênio. Os principais constituintes destes revestimentos são a magnesita, fluorita e calcário, que sendo higroscópicos exigem severas observações quanto às recomendações para armazenagem /7/.

A ação dos compostos existentes nestes eletrodos pode ser entendida sabendo-se que o CaO_2 é desejável para dessulfuração /8/ e, ainda, que, quanto maior a basicidade, menor a susceptibilidade a trincas de solidificação. O CaF_2 aumenta a ductilidade e reduz a temperatura de transição dútil-frágil /5/, reduzindo a atividade do Al_2O_3 e SiO_2 .

A tabela 2.1, apresenta a composições química, típica de um revestimento básico, que deve ser encarada como um guia aproximado.

2.2.2 - Umidade do Revestimento Básico

Durante o processo de fabricação dos eletrodos, eles são submetidos a tratamentos de secagem e/ou cosimento com o

fito de reduzir o conteúdo de umidade a valores ótimos, dentro dos limites fixados pelos fabricantes /10/. Depois de secos os revestimentos absorvem umidade da atmosfera de forma gradual. Esta propriedade do revestimento se conhece pelo nome de higroscopicidade. A absorção de umidade continua até que se alcance um equilíbrio entre a umidade do revestimento e a umidade ambiente, na temperatura existente.

Um nível excessivo de umidade absorvida por condensação ou de outras fontes, no revestimento, pode causar uma ou mais das seguintes complicações:

- porosidade no metal de solda;
- salpicos excessivos;
- instabilidade do arco;
- má conformação do cordão de solda;
- fissuração por hidrogênio;

No caso dos eletrodos básicos, a umidade pode estar presente sob formas diferentes:

- umidade absorvida no revestimento;
- água quimicamente combinada no revestimento, eliminável somente a temperaturas acima de 400°C.

Qualquer que seja a forma como se encontre o H₂O, água combinada ou absorvida, o resultado no arco elétrico será a geração de hidrogênio e o efeito será proporcional a quantidade de hidrogênio gerada.

2.2.3 - Ressecagem

A norma AWS 5.5 - 81 /11/, permite a utilização de eletrodos na condição como recebido, exceto os de baixo hidrogênio. Pelos motivos já citados nos itens anteriores, os eletrodos não estando adequadamente protegidos contra a umidade deverão ser submetidos a uma ressecagem. Esse tratamento, conforme orientação da norma acima, deverá ser a uma temperatura de 533 a 700K (260 a 427°C) por um período de duas horas, devendo permanecer na estufa a 423K (150°C), caso a utilização não seja imediata.

Cada fabricante, entretanto, pode recomendar condições diferentes de ressecagem para seus eletrodos. Vale salientar que o nível de temperatura e o tempo de ressecagem exerce substancial influência nos eletrodos básicos, quanto a velocidade de absorção de umidade, após ressecagem. A figura 2.1 mostra a influência do tempo de ressecagem sobre a absorção de umidade em eletrodos E 7018, evidenciando que tempos prolongados reduzem sensivelmente a velocidade de absorção.

Existem porém, outras condições que limitam o tempo e a máxima temperatura de ressecagem. Embora os eletrodos básicos admitam ressecagem em temperaturas de até 673K (400°C), permitindo assim uma redução drástica do conteúdo de umidade dos revestimentos, sem prejuízo de suas propriedades, temperaturas acima de 673K (400°C) poderiam provocar a oxidação de componentes dos revestimentos, afetando a composição do metal depositado. Um outro fator que certamente provocaria a oxidação dos revestimentos seria um tempo de ressecagem prolongado, acima de duas horas recomendadas pela AWS. A re-umidificação de eletrodos ressecados não é aceita por não poder ser feita nova ressecagem nestes eletrodos, pois, assim feito, ocorreria o aparecimento de danos na sua constituição. Também merecedor de destaque é o fato de que não se deve colocar em estufas eletrodos que não tenham sido ressecados porque eles iriam umedecer eletrodos secos existentes /1/. Desta forma deverão ser colocados em estufas:

- eletrodos provenientes de embalagens recém abertas;
- eletrodos provenientes do forno de ressecagem.

2.2.4 - Ensaio de Determinação de Umidade

A norma AWS A 5.5-69, estabelece o método de obtenção de umidade em eletrodo. A figura 2.2 apresenta o esquema do sistema em questão /12/.

O método consiste na passagem de um fluxo de oxigênio pela amostra de revestimento colocada num cadinho de níquel ou "argila", no interior de um tubo tipo sílica fundida ou de cerâmica resistente a altas temperaturas, aquecido para que se processe a combustão. A água liberada é coletada em tubo "U", previamente pesado, e a quantidade de água é determinada pelo incremento de peso do tubo. A quantidade de umidade deve ser expressa percentualmente relativo ao peso da amostra de

revestimento segundo a seguinte expressão:

$$\% \text{ de umidade} = \frac{H - B}{\text{peso da amostra}} \times 100 \%$$

onde H = ganho em peso da umidade no tubo "U" de absorção;

B = ganho em peso da umidade em branco no tubo "U" de absorção.

A amostra é retirada da parte central de três eletrodos, tendo um peso aproximado de 4g.

A determinação em branco é feita para a obtenção da umidade residual do sistema. Na experiência é feita apenas com o cadinho sem a amostra. O tempo de combustão é de 30 minutos a uma temperatura entre 1163 e 1253K (890 e 980°C), sendo que a pesagem do tubo "U" é feita após 20 minutos para o seu resfriamento.

2.3 - TRINCAS A FRIO, CAUSADAS POR HIDROGÊNIO

2.3.1 - Fatores que Afetam a Formação das Trincas

Os fatores envolvidos na formação das trincas a frio, tanto no metal de solda quanto na zona termicamente afetada, são quatro /2/:

- . Teor de hidrogênio;
- . Nível de tensão;
- . Microestrutura;
- . Temperatura.

Cada um desses fatores apresentam a mesma importância, porém dependendo da situação, um deles pode ser determinante.

Teor de Hidrogênio. Sua presença é praticamente inevitável em soldagens que se utilizam de processos ao arco elétrico /5/, pois está presente no ar, na forma de umidade, nos

aços na forma atômica em solução sólida, ou na forma molecular em inclusões e cavidades ou ainda na superfície dos aços junto as graxas, óleos, tintas e ferrugens. Entretanto a principal fonte de hidrogênio provém da umidade existente nos fluxos e revestimentos dos consumíveis /13/. Este hidrogênio é absorvido pela poça de fusão durante a soldagem ao arco elétrico e pode ser transferido à zona afetada termicamente por mecanismo de difusão. Uma característica marcante do hidrogênio é a sua alta mobilidade na rede cristalina dos metais e sua alta velocidade de difusão a temperatura ambiente. Esta alta mobilidade pode causar vários problemas à junta soldada durante a fabricação, sendo que um dos mais importantes e menos desejável são as trincas induzidas pelo hidrogênio.

O teor de hidrogênio total numa junta soldada é definido como a soma dos teores de hidrogênio difusível (aquele que à temperatura ambiente se difunde para a superfície escapando do metal sólido) e o hidrogênio residual (aquele que permanece na junta soldada). Empiricamente constatou-se /1/ que a determinação do teor de hidrogênio difusível é perfeitamente adequado para fins de especificação dos consumíveis de soldagem, tais como no caso de eletrodos revestidos e fluxos, visto que na maioria das situações a quantidade de hidrogênio residual é apenas uma pequena fração do hidrogênio total.

O teor de hidrogênio difusível é expresso em termos de volume de hidrogênio (ml) por 100 mg de metal depositado e suas faixas típicas são classificadas como:

muito baixa < 5 ml/100 mg;

baixa 5-10 ml/100 mg;

média 10-15 ml/100 mg;

alta > 15 ml/100 mg;

Quanto à distribuição do hidrogênio no metal de solda e zona termicamente afetada, verificou-se que não é homogênea, tanto em escala microscópica como em escala macroscópica. O hidrogênio apresenta-se associado a vários defeitos em escala microscópica no aço, tais como discordâncias, imperfeições, inclusões e vazios internos /14/. Estes fatores também afetam o coeficiente de difusividade do hidrogênio. Tratamentos de pré e pós-aquecimento podem minimizar o problema, já que a temperatura afeta substancialmente a difusividade do hidrogênio. O tempo e a duração deste tratamento, se necessário, é dependente da mobilidade do hidrogênio no metal, que é avaliada

pelo coeficiente de difusividade.

Nível de Tensão. O surgimento de trincas a frio, tanto pode ser influenciado por efeitos metalúrgicos, quanto mecânicos. Desta forma, o mecanismo de formação destas trincas pode ser avaliado sob o aspecto mecânico, já que as trincas iniciam quando a tensão e a deformação atingem valores críticos /1/.

Quando um cordão de solda é depositado entre duas placas, o calor que é transferido causa alguma expansão. Quando a poça metálica vai se resfriando ocorre solidificação e o metal de solda desenvolve significativa contração que ancoram as placas entre si. Quando estas placas não estão livres, produzem uma força de reação, a qual pode ser expressa em termos de intensidade de restrição (Rf) que é a força por unidade de comprimento desenvolvida por unidade de solda contraída /2/. Com o fito de estudar este efeito, vários ensaios foram desenvolvidos. Estes serão estudados em item posterior. Estes ensaios são utilizados para estabelecer parâmetros de segurança, ou seja, determinar os valores críticos de tensão de restrição, de forma a prevenir a formação e propagação das trincas no metal de solda e zona afetada termicamente. Estes valores críticos de tensão de restrição podem ser analisados, considerando-se fatores tais como: A temperatura de pré-aquecimento, teor de hidrogênio difusível, excentricidade da solda, tipo de chãfro, dureza e energia de soldagem.

Temperatura. A temperatura, outro fator importante na geração de trincas por hidrogênio, está relacionada com a variação da taxa de suprimento de hidrogênio aos pontos de nucleação de trincas, que é controlada pela difusão e/ou pelo transporte de hidrogênio por discordâncias /14,15/.

Em aços ferríticos esta fragilização ocorre nas temperaturas entre -373K e +473K (-100°C e + 200°C), com ponto crítico na temperatura ambiente, como mostra a figura 2.3. Conclui-se que, quanto maior a temperatura menor a possibilidade da trinca causada por hidrogênio, independente inclusive, do teor de hidrogênio e microestrutura. Desta forma os tratamentos térmicos de pré e pós-aquecimento da junta são juntamente com os procedimentos como o da ressecagem de fluxos e revestimentos de eletrodos, meios efetivos de prevenir a formação das trincas a frio /13/.

Microestrutura. Os ciclos térmicos existentes na soldagem são significativos na formação de microestruturas favoráveis a geração e propagação de trincas por hidrogênio,

tanto no metal de solda quanto na zona termicamente afetada /16/. Dois fatores influenciam na formação da microestrutura final da junta soldada: composição química e taxa de resfriamento. Este último é função do aporte térmico usado na confecção da junta, temperaturas de pré e pós-aquecimento, espessura e geometria da junta. Em geral, as microestruturas geradas com baixas temperaturas de transformação no estado sólido, como também, as oriundas de altas taxas de resfriamento ou baixo aporte térmico, são as mais críticas à formação de trincas a frio, como por exemplo, a microestrutura martensítica. O controle da taxa de resfriamento é feito com o recurso da variação de aporte térmico e as temperaturas de pré e pós-aquecimento.

Apesar das dificuldades de se identificar as microestruturas do metal de solda, alguns trabalhos têm sido publicados com o fito de solucionar este problema /16,17,18/. Basicamente as microestruturas encontradas são relacionadas das seguintes forma:

- 1 - Ferrita Primária (PF)-|
 - | . Ferrita Primária
 - | de Contorno de
 - | Grão PF(G).
 - | . Ferrita Poligonal
 - | Intergranular PF(I).
 - \-

- 2 - Ferrita de Segunda Fase (FS) -|
 - | . Ferrita de Segunda
 - | Fase Alinhada FS(A).
 - | . Ferrita de Segunda
 - | Fase Não - Alinhada
 - | FS(NA).
 - \-

- 3 - Ferrita Acicular (AF).
- 4 - Agregado Ferrita - Carboneto - (FS).
- 5 - Martensita (M).

A Ferrita Primária, subdividida em Ferrita Primária de Contorno de Grão PF(G) e Ferrita Poligonal Intergranular PF(I) /8/, forma-se entre 1273 e 973K (1000° e 700° C) com seu crescimento controlado por difusão. Estas

microestruturas são consideradas como sítios de nucleação de trincas a frio, apesar de não serem inteiramente frágeis, pois são geralmente circundadas por microestruturas de maior resistência e maior fragilidade, que se formam em baixas temperaturas e não resistem às deformações impostas pela concentração de tensões. Estas microestruturas possuem grãos grosseiros da ordem de 200 e 300 μ e, em geral, não são desejáveis quando a intenção é evitar trincas a frio.

A Ferrita de Segunda Fase (FS) é subdividida em Ferrita de Segunda Fase Alinhada FS(A) e Ferrita de Segunda Fase Não-Alinhada FS(NA). Estes microconstituintes são considerados bainíticos, sendo que FS(A) está ligada a bainita superior e a FS(NA) está ligada a bainita inferior. Na bainita superior existem partículas de cementita que precipitam diretamente da austenita entre ripas ou placas paralelas de ferrita, geralmente alongadas na direção de crescimento. Na bainita inferior, os carbonetos encontram-se dentro de grãos ferríticos em ângulos de aproximadamente 60 graus na direção de crescimento das placas. Devido a retenção de austenita entre as placas da FS(A), esta é considerada prejudicial à resistência por clivagem das juntas soldadas. Em geral estes microconstituintes são indesejáveis em metais de solda por favorecerem à nucleação e propagação de fratura frágil /19,20/.

É comum entre os pesquisadores /17,19/ admitir-se que a microestrutura mais desejável é a Ferrita Acicular (AF). Esta formação geralmente envolve elementos de cisalhamento que é essencialmente controlada por difusão, produzindo uma austenita enriquecida de carbono nos intertícios dos grãos aciculares. Este microconstituente é formado numa faixa de temperatura abaixo de 873K (600° C), mas acima da temperatura de formação de bainita /13/. Os contornos de alto ângulo, juntamente com os grãos finos de ferrita acicular (0.1 a 1 μ), favorecem uma excelente combinação entre resistência as trincas a frio e tenacidade /19,20/.

A microestrutura chamada agregado ferrita-carboneto é composta de estruturas perlíticas facilmente observadas através de microscopia eletrônica. Apresentam-se em pequenas quantidades, exceto em depósito de solda com alta energia de soldagem. A nucleação da perlita ocorre nos contornos de grão austeníticos, pela decomposição da austenita em lamelas de ferrita e cementita, relativamente paralelas e espaçadas uniformemente. Uma diminuição destes espaçamentos acarreta uma diminuição de tenacidade à fratura da microestrutura, ao passo que um aumento melhora esta propriedade. O tamanho das colônias

são tão importantes quanto o tamanho dos grãos, pois, os contornos das colônias de perlita evitam a propagação das trincas por clivagem.

A microestrutura mais susceptível às trincas induzidas pelo hidrogênio é a Martensita (M). Esta é formada por mecanismo de cisalhamento em temperaturas abaixo da temperatura de transformação bainítica e pode ser diferenciada como "Martensita em Ripa" ou "Martensita Maclada", que são, respectivamente, martensita de baixo carbono e martensita de alto carbono. A martensita do tipo maclado é produto de menor temperatura de transformação, já uma característica da martensita em forma de ripas é sua alta temperabilidade. Uma vez auto-temperada, somente poderá ser distinguida da bainita inferior por microscopia eletrônica /17,18/.

2.3.2 - Morfologia e Tipos de Trincas

As trincas a frio causadas por Hidrogênio podem ocorrer no metal de solda ou na zona afetada termicamente. No caso de metal de solda essas trincas podem ser caracterizadas macroscopicamente de acordo com :

- a) A região onde ocorrem - transversal ou longitudinal;
- b) A sua orientação em relação a junta soldada - transversal ou longitudinal;
- c) A sua posição na junta soldada - raiz, central ou superficial;

Essas trincas iniciam-se, preferencialmente, na raiz da solda e podem, ter comprimento desde alguns microns até centímetros, podendo comprometer inteiramente a junta soldada. No aspecto microscópico estas trincas são preferencialmente transgranulares, como no caso de depósito em aços doce ao carbono e aços carbono-manganês. Entretanto, estas trincas podem ocorrer nos contornos de grãos de ferrita proeutetoide, como no caso de depósito em aços baixa liga e ao Cr-Mo. Em ambas as condições as trincas possuem aspecto rigorosamente agudo. Salienta-se que em casos especiais as trincas a frio podem ser mistas, ou seja, transgranulares e intergranulares simultaneamente.

Além da morfologia das trincas a frio acima citada, três outros tipos de menor importância são identificadas: as Microtrincas, os defeitos tipo Olho de Peixe e as trincas Chevrons /15/.

2.3.3 - Ensaios de Soldabilidade

Com o objetivo de avaliar a influência dos quatro fatores geradores de trincas (tensão, temperatura, teor de hidrogênio e microestrutura) foram desenvolvidos vários ensaios de soldabilidade /5/. Estes ensaios, apesar de serem muitos, não representam o comportamento real da maioria das estruturas que utilizam solda como elo de união, mesmo quando combinados, dada a complexidade de se simular as condições reais de restrição, fixação, tensão, temperatura, etc., com isso, o que se faz, é utilizar nos ensaios, condições rigorosas ou pelo menos semelhantes as condições reais de fabricação /13/. Estas limitações não impedem que os ensaios de soldabilidade forneçam informações úteis para uma boa solda isenta de defeitos.

Os ensaios de soldabilidade são divididos, em dois grupos /13/: os de auto-restrição, tais como: Ensaio TEKKEN, Ensaio LEHIGH e o Ensaio de Severidade Térmica Controlada, onde o nível de tensões internas provenientes da retração durante o resfriamento influencia, sobremaneira, o risco de ocorrência de trincas a frio, e os ensaios de restrição externa, tais como: Ensaio de Restrição Rígida, Ensaio de Restrição Tensionada, Ensaio de Implante e Ensaio de Restrição Controlada. Nestes últimos, as tensões aplicadas ao corpo de prova são provenientes de agentes externos, podendo ser controladas, conforme a necessidade do ensaio.

O Ensaio TEKKEN é o mais utilizado internacionalmente para avaliação das trincas a frio, tanto no metal de solda quanto na zona termicamente afetada. Esse ensaio foi idealizado no Instituto Ferroviário de Pesquisas Tecnológicas do Japão (TETSUDO KEKYUSHO), e tem sido amplamente utilizado devido a sua facilidade de elaboração, versatilidade, baixo custo, simplicidade para quantificar a percentagem de trinca e boa reprodutibilidade, com aplicação no estudo da soldabilidade de aços estruturais e de alta resistência, como também na relação de procedimento de soldagem. É utilizado com sucesso em aplicações especiais tais como: aços para tubulação de gás ou petróleo, ou ainda, para avaliação de estruturas submarinas. Considera-se como a maior limitação deste ensaio, a impossibilidade de avaliar os níveis de tensão imposta à solda.

Exemplificando, alguns autores que utilizaram Ensaio TEKKEN, tem-se: SAWHILL e colaboradores /21/, que utilizou o ensaio para avaliar a soldabilidade de aços de alta resistência para tubulação; WINGROVE /22/ analisou a formação de bolhas no metal de solda usando Ensaio TEKKEN e, ainda, ALCANTARA e ROGERSON /23/, que utilizaram a técnica de emissão acústica para

medir o "período de demora", tempo para iniciação da trinca em corpo de prova TEKKEN, em função da taxa de difusão de hidrogênio.

O corpo de prova TEKKEN, mostrado na figura 2.4, pode ser concebido tanto com chanfro em y simétrico (indução de trincas no metal de solda), como chanfro em y oblíquo (indução de trincas na zona termicamente afetada). O ensaio consiste na aplicação de um cordão de solda para teste, no chanfro de um corpo de prova, previamente preparado com solda de restrição (como mostra a figura no corte X - X).

Métodos para medição de trincas. Através de experiências realizadas, utilizando-se testes de emissão acústica, com corpo de prova TEKKEN de 19mm de espessura, ALCANTARA E ROGERSON /23/, concluíram que a trinca a frio pode ocorrer num espaço de até 48 horas. Baseando-se nestas informações, os corpos de prova devem ser seccionado para análises somente após decorrido esse tempo.

Alguns métodos utilizados para verificação de trincas a frio são: Índice Médio de Trincas (IMT), Coeficiente Médio de Trincas (CMT), e o método de verificação por fratura: A figura 2,5, ilustra a execução do método para medição do IMT.

O CMT é a relação entre o somatório do comprimento real das trincas (em mm) e o somatório das áreas das seções transversais do metal de solda (em mm²), cuja fórmula mostra-se a seguir /24/:

$$CMT = \frac{\sum \text{comprimento da trinca}}{\sum \text{área transversal do cordão de solda}} (1/mm) \quad (I)$$

Para que os métodos citados sejam aplicados, necessário se faz, que o cordão de solda, isolado do restante do corpo de prova, seja seccionado transversalmente em oito pequenas seções, de 10mm cada, para depois serem submetidas ao processo de medição de trincas. A figura 2.6 mostra a distribuição das seções para análise.

Um outro método, usado para avaliação de trincas, consiste em isolar a parte central do corpo de prova da solda de restrição, como mostra a figura 2.7. A parte central do corpo de prova, onde se encontra a solda de teste, é submetida a um aquecimento em forno previamente aquecido a 673K (400° C), por uma hora. Após o resfriamento é quebrado ao longo do cordão de solda, numa fratura delineada pela trinca induzida durante o

ensaio. A fratura é conseguida através de pancada com um martelo ou pressão executada por prensa hidráulica. Para uma melhor execução do processo, forma-se uma ponte com o corpo de prova a ser fraturado, colocando-se em suas extremidades duas peças de aço, servindo de cabeceira. A trinca original, induzida durante o ensaio, oxida no forno, mudando sua coloração para um azul escuro, enquanto a parte não trincada antes, apresenta aspecto de fratura nova. A figura 2.8, ilustra seções fraturadas de cordões de solda, onde se observa trincas induzidas, de cor escura, e fraturas provocadas pelo martelo. A figura mostra ainda, a estimativa para o cálculo do índice de trincas, através das áreas escurecidas pela oxidação. O índice de trincas pode ser avaliado pela medição direta da área escurecida, em função da área total do cordão de solda, ou por simples estimativa visual, comparando com um mapa construído para esta finalidade, como o da figura 2.8. O uso do mapa pode não ser sempre satisfatório porque a trinca não aparece sempre com o aspecto mostrado na figura 2.8 /24/.

2.3.4 - Procedimento de Soldagem para evitar Trincas a Frio

Com a finalidade de minimizar o problema de trincas a frio induzidas por hidrogênio, vários procedimentos foram desenvolvidos:

Ressecagem - Na utilização de eletrodos básicos, a norma vigente determina os índices máximos de umidade permitidos nos revestimentos para se obter juntas soldadas com o mínimo de hidrogênio difusível. Os parâmetros de ressecagem são fornecidos pelo fabricante e variam com o tipo de revestimento. Após a ressecagem os eletrodos devem ser acondicionados em estufas, para evitar a re-umidificação dos mesmos.

Carbono Equivalente - De maneira geral a susceptibilidade ao trincamento de uma junta soldada em aços C-Mn e aços de alta resistência é função da fragilidade da microestrutura. Para avaliar a influência de certos elementos na formação de trincas por hidrogênio, foram elaboradas fórmulas. A mais aplicada é a apresentada pelo Internacional Institute of Welding (IIW), chamada fórmula de carbono equivalente (CE) /25/.

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

Apesar desta fórmula ser limitada a aços com teor de carbono superior a 0.2% e cujo CE calculado seja menor que 0,6, ele é bastante utilizada, sendo para que aços CE > 0,40 será provável a ocorrência de trincas.

Uma outra fórmula foi desenvolvida por Ito Bessyo (Pcm) para aços com teores de carbono inferior a 0.1%, ou seja:

$$P_{cm} = C + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Si}{80} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

O carbono equivalente de Ito Bessyo (Pcm), juntamente com os valores de teor de hidrogênio difusível (Hd) e da intensidade de restrição (Rf), foram usados na determinação do parâmetro (Pw), por Ito Bessyo.

$$P_w = P_{cm} + \frac{Hd}{60} + \frac{Rf}{40.000}$$

Temperatura Crítica de Pré-Aquecimento de Ito Bessyo - ITO BESSYO /18/ propôs associar o parâmetro de trincas (Pw) com a temperatura mínima de pré-aquecimento (To) para evitar as trincas por hidrogênio.

$$T_o \text{ (} ^\circ\text{C)} = 1440 P_w - 392$$

Onde Pw é válido na seguinte situação:

$$1000 \leq Rf \leq 3300 \quad (\text{alta intensidade de restrição})$$

$$Hd \leq 5ml/100g \quad (\text{baixo teor de hidrogênio})$$

$$0.07\% \leq C \leq 0.18\% \quad (\text{aços de baixo carbono})$$

Parâmetro de Trinca de Suzuki - Para encontrar a temperatura mínima de pré-aquecimento (To) Suzuki desenvolveu o parâmetro de trinca (Pha), relacionando-o com o teor de hidrogênio difusível (Hd), a intensidade de restrição e o carbono equivalente de Ito-Bessyo (Pcm) /26/.

assim

$$Pha = \log (0.89Hd) + F \quad (\text{eletrodos básicos})$$

$$Pha = \log (0.36Hd) + F \quad (\text{eletrodos celulósicos})$$

Onde F é definido da seguinte forma:

$$P/750 \leq Rf < 1000$$

$$F = (6.32 + 2.6 \times 10^3 Rf) P_{cm} - 0.1 \times 10^3 Rf - 1.92$$

$$P/1000 \leq Rf < 2090$$

$$F = (7.71 + 1.19 \times 10^3 Rf) P_{cm} - 0.1 \times 10^3 Rf - 1.93$$

$$P/2090 \leq Rf < 2720$$

$$F = (4.55 + 2.67 \times 10^3 Rf) P_{cm} - 0.268 \times 10^3 Rf - 1.58$$

$$P/2720 \leq Rf$$

$$F = 11.9 P_{cm} + 0.089 \times 10^3 Rf - 2.55$$

e para espessuras entre 20 e 50mm

$$T_0(C) = 146 P_{ha}$$

- limitações: - valores obtidos com aporte térmico fixo (1.7kJ/mm);
- aplicável em aços com baixos teores de carbono $\leq 0.18\%$
 - aplicados para chapas com espessura variando de 20 a 50 mm.
 - obtido em depósito com passe único.

Dureza Máxima de Suzuki - Através da dureza máxima de Suzuki (Hmax) pode-se avaliar a susceptibilidade das trincas a frio causadas por hidrogênio, a ductilidade da junta de solda e a susceptibilidade às trincas de corrosão sob tensão. Nesta fórmula foram utilizadas as constantes, H_{00} , X, Y, Z e α ; o valor de carbono equivalente de Ito-Bessyo ($P_{cm}\%$), do teor de carbono (C%) e do tempo de resfriamento de 1073K para 773K (800/500 C) /26/.

$$H_{max} (Hv - 10) = H_{00} + \frac{x}{1 + \exp(\alpha(Y-Z))}$$

onde Y = $\log t(8/5)$ - tempo de resfriamento de

1073 para 773 K (800/500° C)

$$H = 884 C + 287 - X$$

$$X = 237 - 1633 C - 1157 P_{cm}$$

$$\alpha = \frac{566 + 5532 C - 2280 P_{cm}}{X}$$

$$Z = 0.0300 - 6.00 + 7.77 P_{cm}$$

Diagrama de Eficiência Térmica de Bernard - Este diagrama utilizado para aços C-Mn e aços de alta resistência relaciona a dureza máxima da zona termicamente afetada com as trincas causadas por hidrogênio. Dessa forma, são considerados os seguinte parâmetros:

- energia de soldagem;
- geometria da junta;
- processo de soldagem;
- temperatura de pré-aquecimento.

No diagrama da figura 2.9, obtêm-se o tempo de resfriamento, com este valor consulta-se um gráfico, fig 2.10, elaborado para aços ao Mn de alta resistência, para determinação da dureza máxima. O tempo obtido deverá ser usado na redução da temperatura de 973K para 573K (700/300°C) advindo daí uma dureza ideal na ZTA para que se tenha uma mínima possibilidade de formação de trinca /5/.

Norma Britânica BS 5135 - A norma britânica "Metal Arc Welding of Carbon Manganese Steels" considera a composição química do metal base, a temperatura de pré-aquecimento, a espessura combinada, os parâmetros de energia de soldagem e tipo de consumíveis para prever, através de tabelas, a temperatura mínima de pré-aquecimento, a energia de soldagem indicada e o diâmetro do eletrodo a ser utilizado para evitar as trincas a frio causadas por hidrogênio na zona afetada termicamente /27/.

Estes gráficos e tabelas não são apropriados para aços com teor de Carbono < 0.10%, e em casos de soldagem de placas com mais de 50mm de espessura. Entretanto, são aplicáveis em aços ao C, ao C-Mn, aços de alta resistência e baixa liga, podendo em alguns casos serem aplicáveis para se evitar as

trincas a frio no metal de solda /13/.

Diagrama de Erevisão de Alcântara - Estes diagramas introduzem um novo conceito de "Coeficiente Médio de Trincas" que é a relação entre o comprimento real da trinca e a área do metal de solda /23/. Estes diagramas são obtidos a partir de resultados experimentais, para soldagem de aços estruturais, utilizando-se eletrodos básicos com diferentes limites de resistência para se avaliar a formação das trincas a frio no metal de solda, a partir do conhecimento do teor de hidrogênio difusível e energia de soldagem, conforme pode ser visto na figura 2.11.

TABELAS E FIGURAS DO CAPÍTULO

2

COMPOSTO	TiO ₂	SiO ₂	CaCO ₃	CaF ₂	FeSi	FERRO-LIGA
TEOR %	2	10	35	35	6	VARIÁVEL

TABELA 2.1 - Exemplo de composição química do revestimento básico /9/

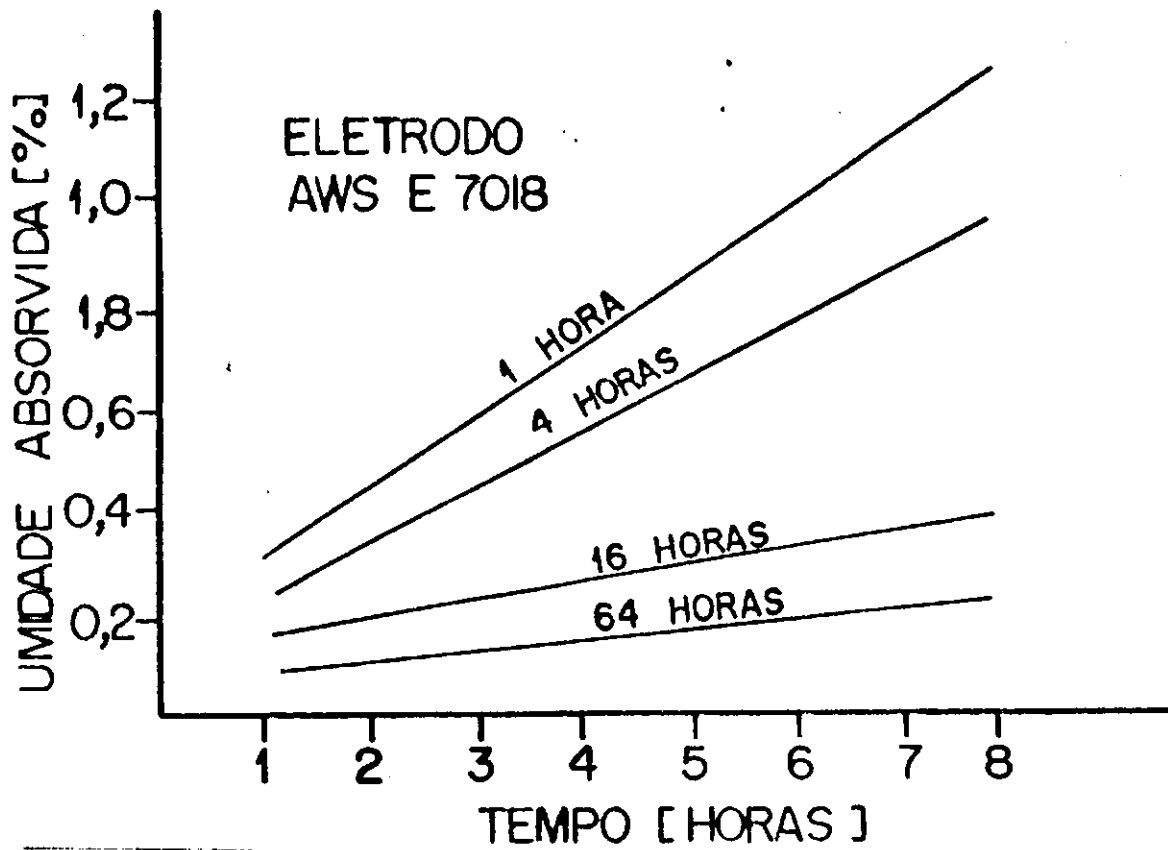


FIGURA 2.1 - Influência do tempo de ressecagem sobre a umidade absorvida a 301K (28°C) e 70% de umidade relativa. A temperatura de ressecagem foi de 692K (420°C) /10%.

ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE UNIDADE

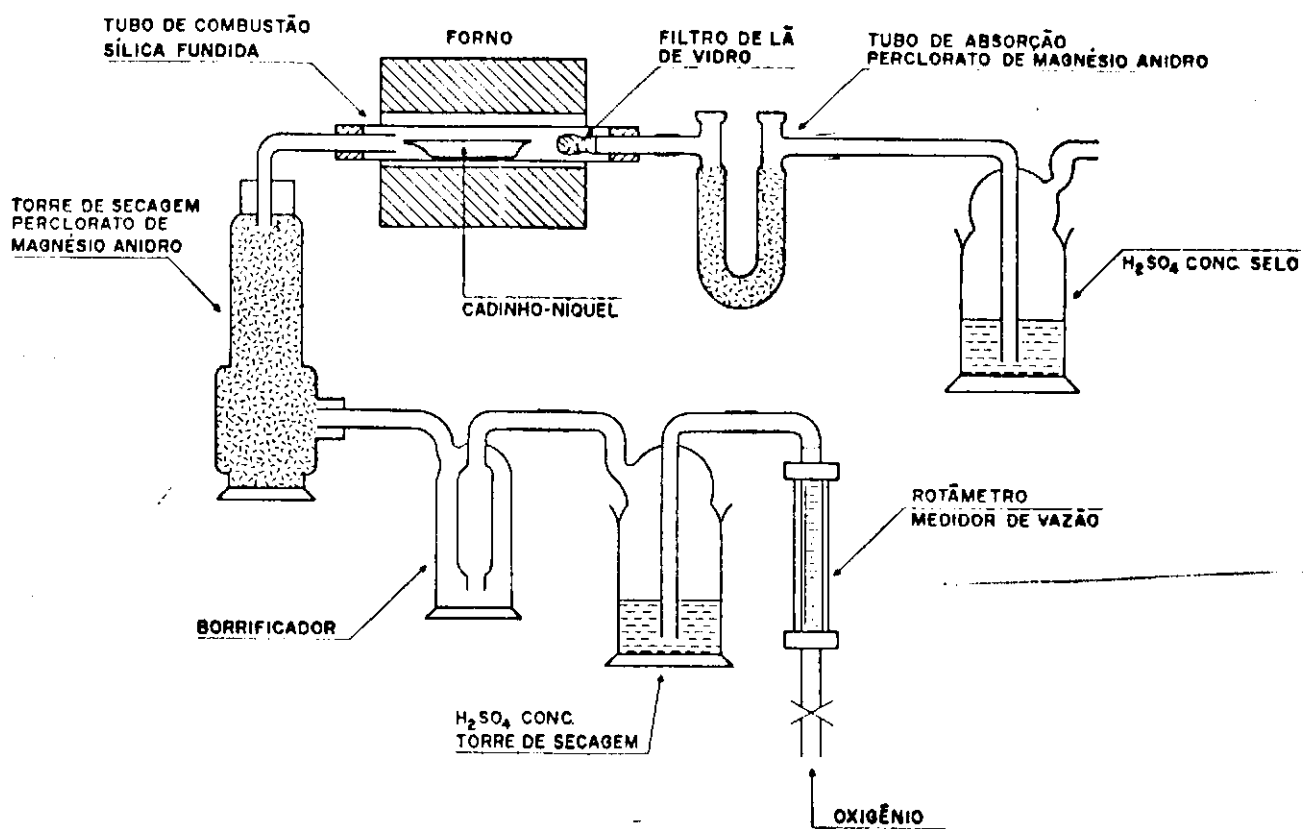


FIGURA 2.2 - Esquema do equipamento para determinação de unidade do revestimento. /12/

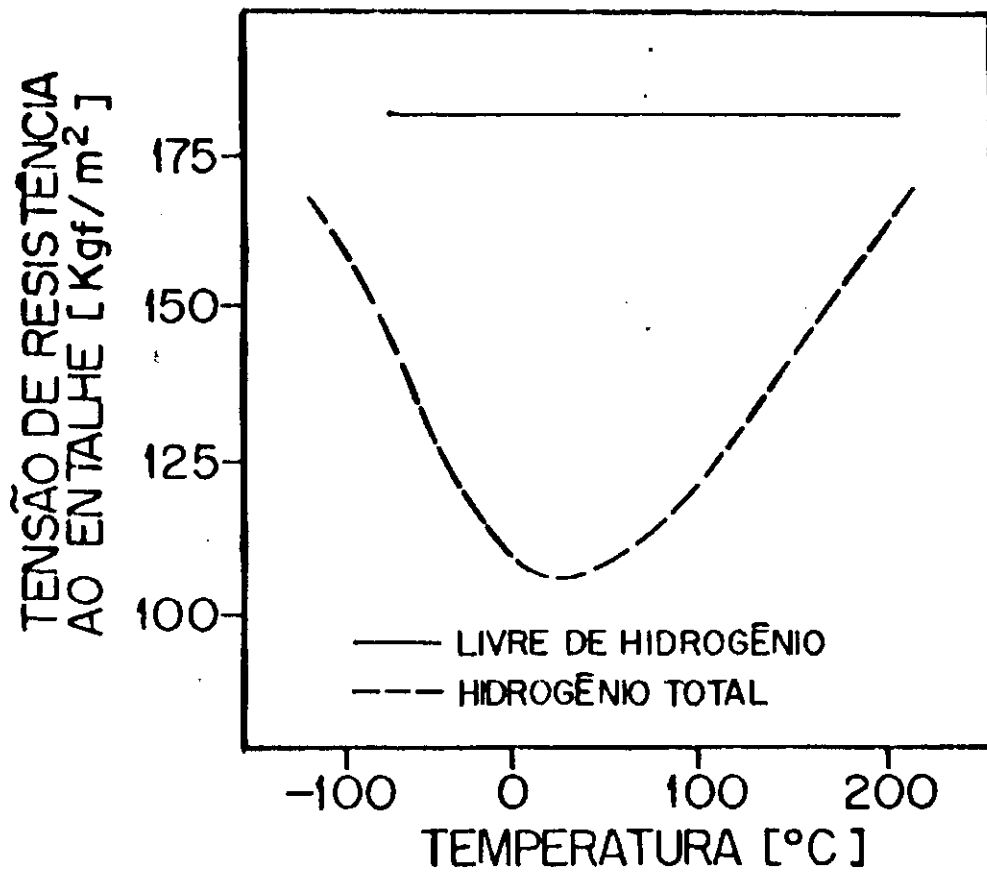


FIGURA 2.3 - Efeito da temperatura na fragilização por hidrogênio /13/.

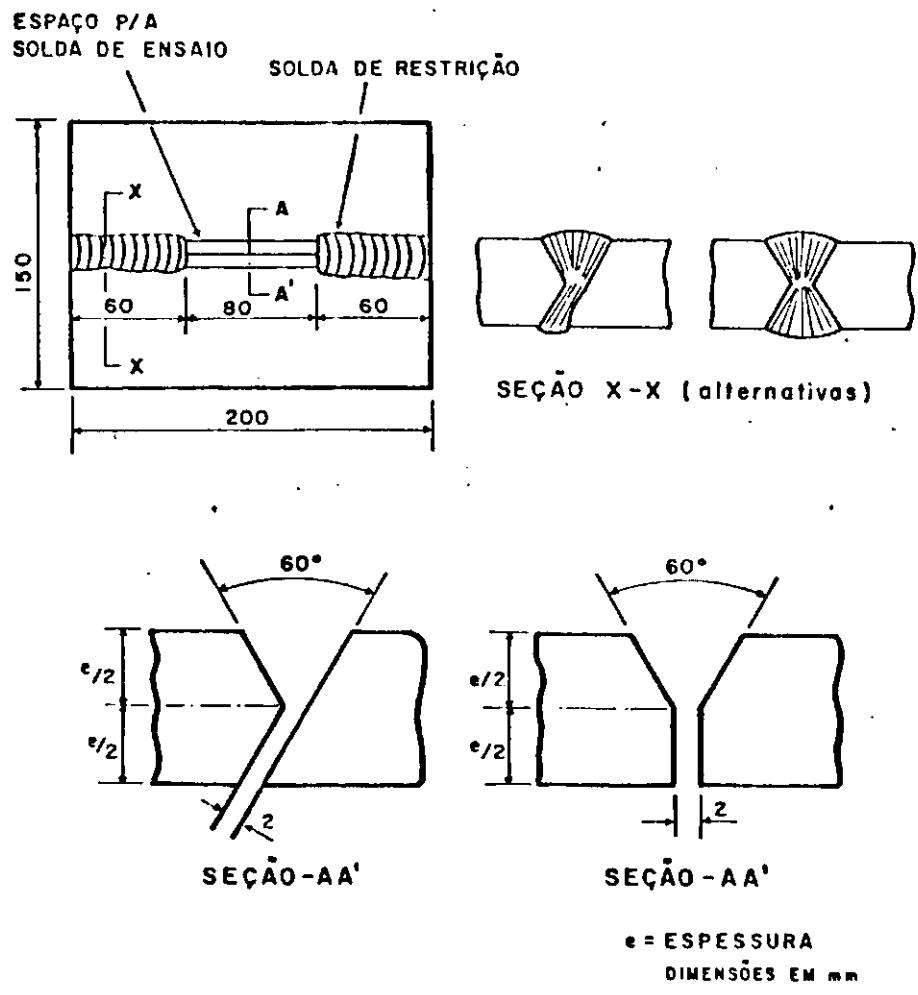
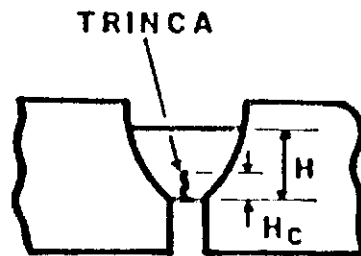
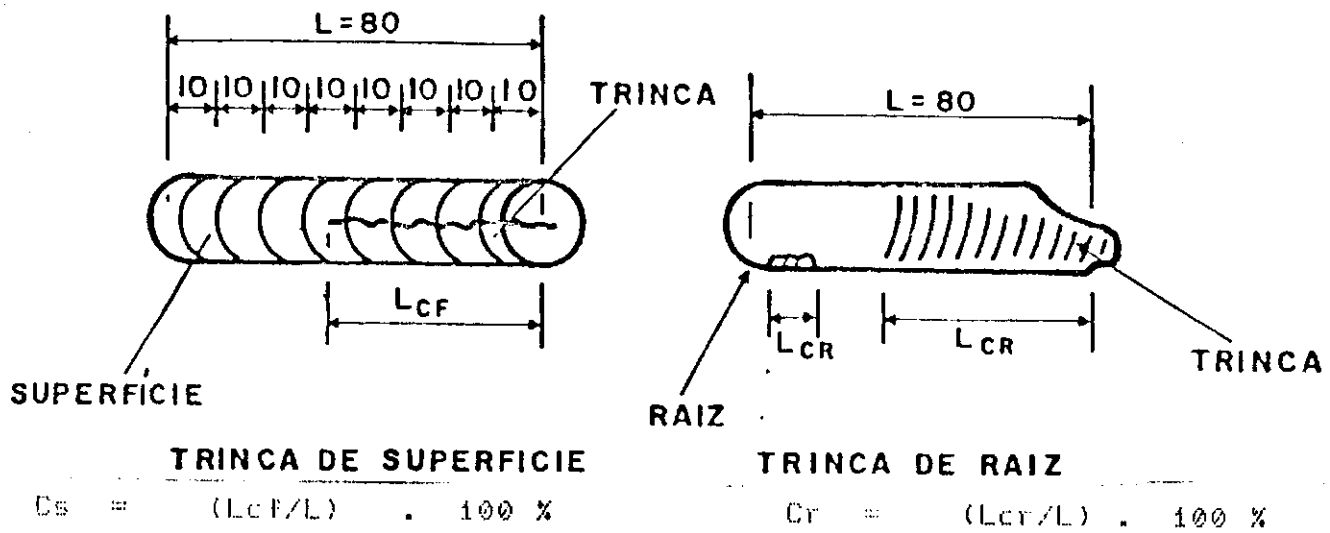


FIGURA 2.4 - Corpo de prova para ensaio de avaliação de trincas a frio, de auto restrição TEKKEEN .1/5/



PROFUNDIDADE DA TRINCA

$$C_b = \left(\frac{H_c}{H} \right) \cdot 100 \%$$

$$\text{Índice Médio de Trinca (IMT)} = (C_s + C_r + C_b) / 3$$

FIGURA 2.5 - Índice de trincas no metal de solda ./18/

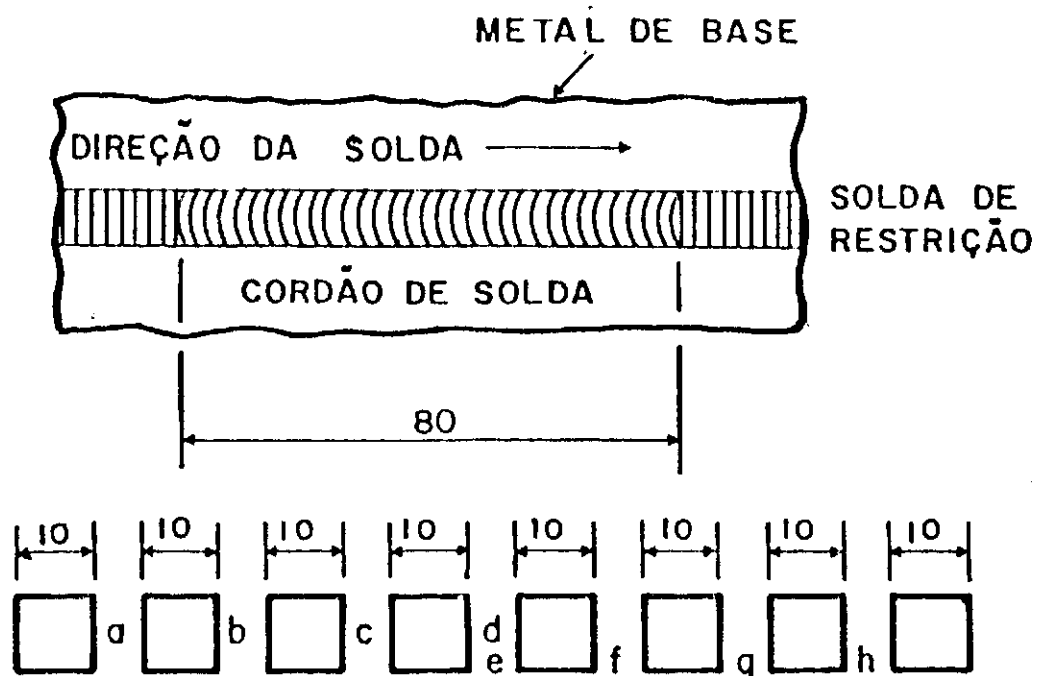


FIGURA 2.6 - Seleção das seções do cordão de solda para análise: a, b, c, d, e, f, g, e h são utilizadas para medição de trincas; a seção d para teste de dureza Vickers; seção e para exame metalográfico. (As dimensões são em mm). /18/

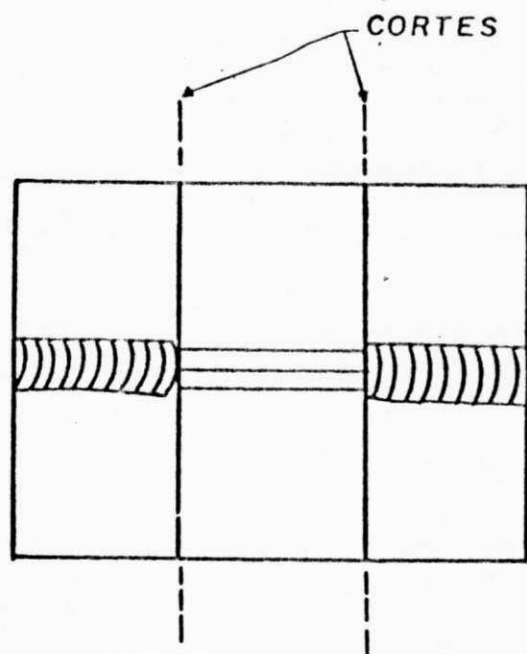


FIGURA 2.7 - Corte para isolamento da parte central do corpo de prova.

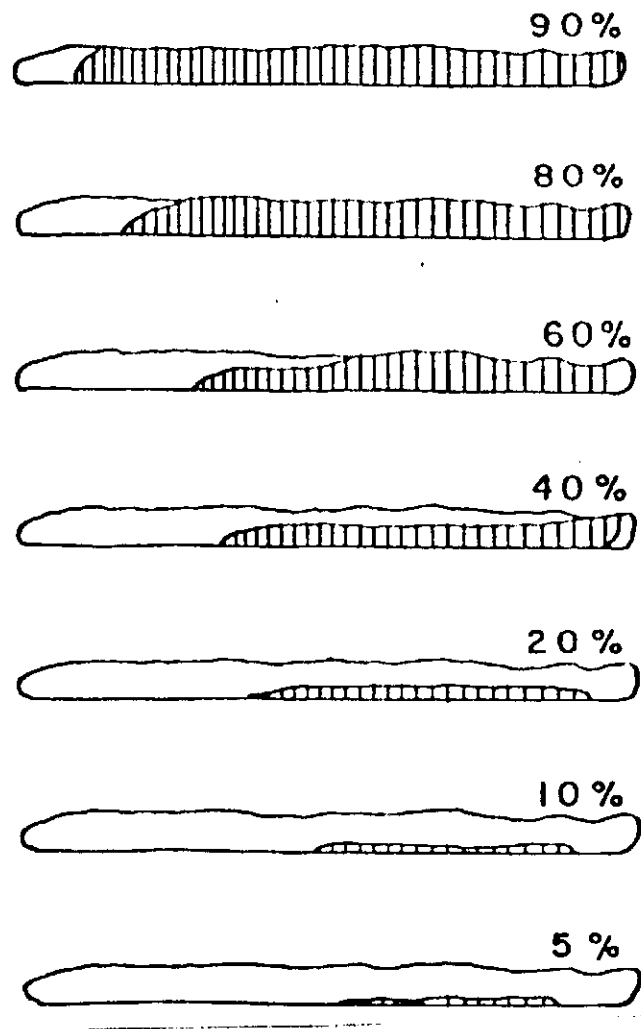


FIGURA 2.8 - Mapa com percentuais estimados do índice de trincas. Os valores percentuais são obtidos pela relação entre a área escurecida resultante da trinca induzida, oxidada pelo calor, e a área total fraturada do cordão de solda . /19/

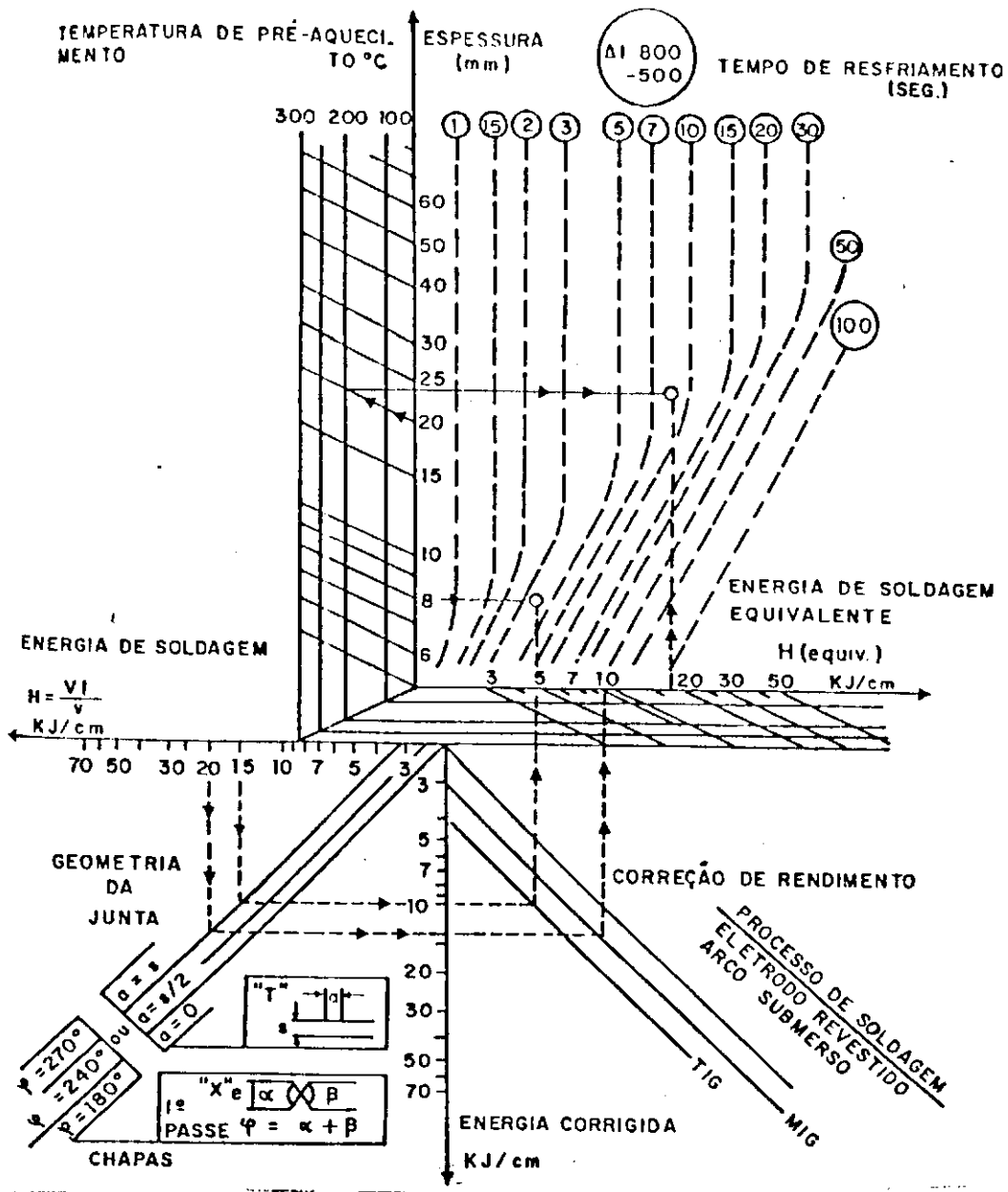


FIGURA 2.9 - Diagramas de eficiência térmica para tempo de resfriamento entre 1.073 e 773K (800 e 500° C) em função das condições de soldagem. /13/

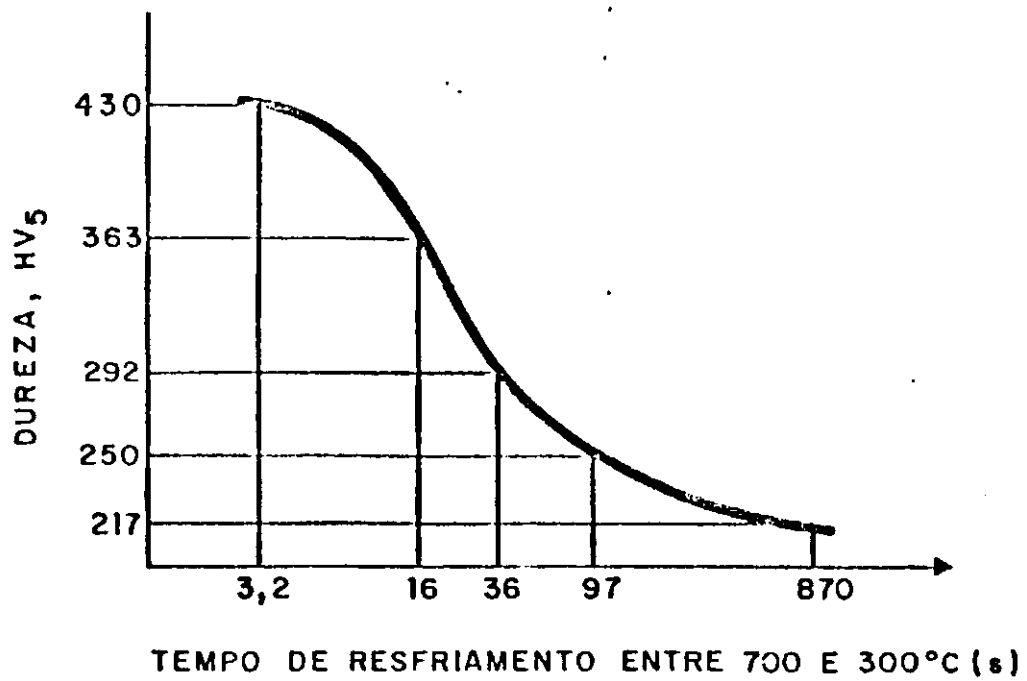


FIGURA 2.10 - Curva típica de dureza para aços C-Mn (0,16% C e 1,16% Mn). /5/

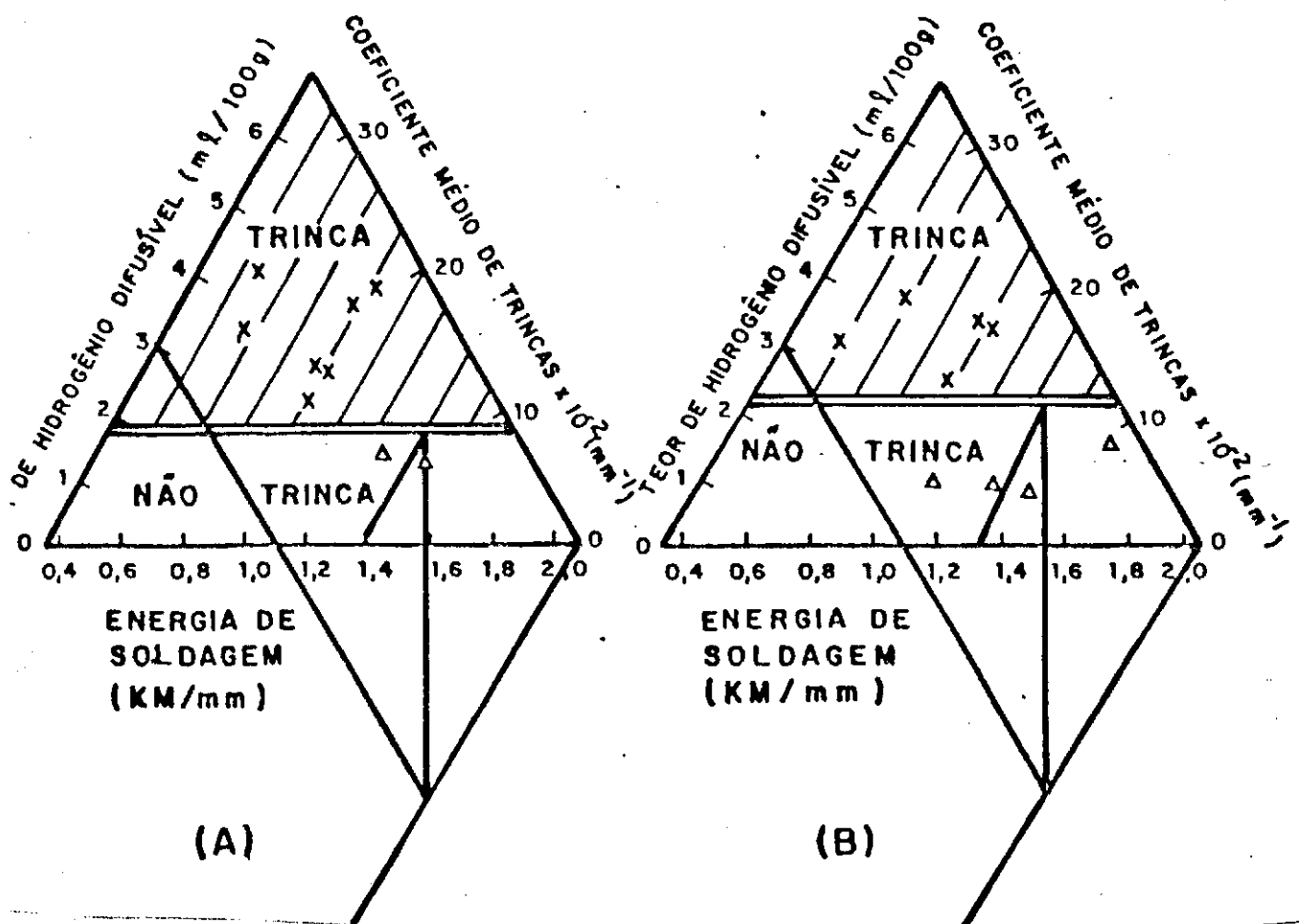


FIGURA 2.11 - Diagramas de previsão de formação de trincas a frio considerando energia de soldagem e teor de hidrogênio difusível. (A) Eletrodos AWS E 10018, (B) Eletrodos AWS E 13018. /5/

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - ABSORÇÃO DE UMIDADE

3.1.1 - Materiais e Equipamentos

Neste trabalho, foram selecionados eletrodos revestidos de baixo hidrogênio, do tipo básico, classificação AWS E 8018 e E 10018, com 3,5 mm de diâmetro, de fabricação nacional. Os eletrodos foram adquiridos acondicionados em embalagens metálicas originais, devidamente lacradas. E 8018 é um eletrodo recomendado para soldagens de grande responsabilidade em aços ASTM A - 516 - Grau - 70 especificação A - 300, bem como em aços de alta resistência e aços ligados ao Ni para baixas temperaturas, apresentando alta qualidade do metal depositado em todas as posições /28/. E 10018 é usado em soldagem de grande responsabilidade, em aços revenidos e outros com elevada resistência à tração, onde não seja possível o pré-aquecimento e o tratamento térmico posterior. É usado em todas as posições e em todos os tipos de juntas /28/. A composição química e as propriedades mecânicas do metal de adição destes eletrodos, fornecidas pelos fabricantes, estão relacionadas nas tabelas 3.1 e 3.2.

Para a medida da umidade contida no revestimento do eletrodo, foi construído um equipamento de acordo com a norma AWS A 5.5-69 /12/. Este equipamento, mostrado na figura 3.1, consta dos seguintes detalhes:

- O esquema da figura, agrupa um forno tubular, um tubo de combustão, um sistema de alimentação de oxigênio (válvula de agulha, medidor de vazão, frasco de lavagem de gás, borrifador e uma torre de secagem), um sistema de absorção de água, (tubo "U" e um frasco com selo de ácido). O ácido usado nos dois frascos (frasco de lavagem de gás e frasco com selo de ácido) é o ácido sulfúrico a 96%. O produto usado no tubo "U" e torre de secagem foi o perclorato de magnésio anidro.
- A potência do forno é de 1500W, e o controle da temperatura foi feito por um controlador e registrador de temperatura.

- Um cadinho de cerâmica refratária em forma de barqueta foi utilizado para colocar a amostra no interior do tubo de combustão.

Os equipamentos utilizados para avaliação da absorção de umidade por exposição ao ar livre foram:

- forno tipo mufla para ressecagem, marca QUIMIS, com câmara de 0.16 x 0.16 x 0.35 m, temperatura máxima de 1473K (1200°C) e precisão de ± 5 graus à 673K (400°C), potência 2.5 kw;
- aparelho termohigrógrafo GTE 900, fabricado pela MULTITEL S.A com registro contínuo de temperatura e umidade;
- balança eletro-mecânica SARTORIS 2474, com precisão de 0.01mg;
- estufa fabricada pela TERMOSOLDA LTDA, com câmara cilíndrica de 0.30 m de diâmetro e 0.60m de comprimento, temperatura ajustável de 323K a 573K (50 a 300°C), potência 1,0kw;
- cochicho de PVC revestido internamente com folha de alumínio e protegido com sílica-gel contra umidade;
- cochicho de PVC revestido internamente com folha de alumínio e isolado termicamente com lã de quartzo.

Para verificação do nível de absorção de umidade em câmara climatizada, foram utilizados os mesmos equipamentos acima citados, além de uma câmara climatizada POWER-O-MATIC 60, fabricada pela BLUE M - Electric Company - Illinois - USA. As limitações das faixas de temperatura e umidade relativa dependem das condições ambientais locais. A temperatura tem sua faixa de atuação de 12 graus acima da temperatura ambiente, até 366K (93°C). Por sua vez, os níveis de umidade relativa estão sujeitos à temperatura de trabalho da máquina, sendo possível uma umidade mínima de 40% somente para uma temperatura mínima de 353K (80°C). As dimensões da câmara são de 0.4 x 0.5 x 0.5 m, e potência de 0.75 kw.

3.1.2 - Métodos

Umidade Contida no Revestimento dos Eletrodos -

Nesta etapa determinou-se o teor da umidade dos revestimentos dos eletrodos na condição ressecado. A experiência foi desenvolvida em três etapas: preparação das amostras, teste em "branco" e teste das amostras.

1 - Preparação das Amostras.

- a - remoção dos eletrodos da embalagem original;
- b - colocação dos eletrodos em forno para ressecagem a 673K (400°C) por 2 horas;
- c - transferência dos eletrodos do forno para estufa a 423K (150°C);
- d - colocação dos cadinhos em estufas a 423K (150°C).

2 - Teste em "Branco".

- a - pesagem do tubo "U";
- b - colocação do cadinho no tubo de combustão;
- c - acionar sistemas de aquecimentos e fluxo de oxigênio;
- d - expor o cadinho por meia hora a uma temperatura entre 1163 a 1253K (890 a 980°C);
- e - desligar o aquecimento de fluxo do oxigênio;
- f - pesar tubo "U" após resfriamento por 20 min;

3 - Teste das Amostras:

- a - retirada de amostras da parte central de três eletrodos;
- b - pesagem das amostras (aproximadamente 4g);
- c - colocação da amostra no cadinho;
- d - acionamento dos sistemas de aquecimento e fluxo de oxigênio;

- e - exposição da amostra por meia hora a uma temperatura entre 1163 a 1253K (890 a 980° C);
- f - desligamento do aquecimento e fluxo de oxigênio;
- g - pesar tubo "U" após resfriamento por 20 min;
- h - cálculo da umidade.

Absorção de Umidade por Exposição ao Ar Livre - Nesta etapa determinou-se a absorção de umidade dos eletrodos em função do tempo de exposição. A experiência foi desenvolvida na seguinte sequência:

- a - remoção dos eletrodos da embalagem original;
- b - pesagem na condição "como recebido";
- c - ressecagem a 673K (400°C) por 2 horas;
- d - retirada do forno de ressecagem e imediata transferência para estufa a 423K (150°C). Após atingida essa temperatura, transferência dos eletrodos para o "cochicho" para resfriamento até à temperatura ambiente. Em seguida, pesagem dos mesmos na condição ressecados;
- e - exposição ao ar livre em sala provida de aparelho termohigrógrafo. Os eletrodos foram dispostos verticalmente em uma base de madeira presos pela extremidade descoberta distando uns dos outros em aproximadamente 0.04 m;
- f - pesagem diária para acompanhamento do ganho de peso durante 35 dias;
- g - elaboração dos gráficos com os resultados obtidos.

Absorção de Umidade em Câmara Climatizada - Por este método determinou-se a absorção de umidade, para os dois tipos de eletrodos submetidos à câmara climatizada, nas seguintes condições:

- . 313K (40°C) e 80% de umidade relativa
- . 323K (50°C) e 80% de umidade relativa
- . 333K (60°C) e 80% de umidade relativa
- . 333K (60°C) e 60% de umidade relativa
- . 333K (60°C) e 90% de umidade relativa

Para cada uma das condições de temperatura e umidade relativa determinou-se o ganho de peso em função do tempo, até uma exposição máxima de 5 horas, com os seguintes intervalos de verificação: 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, e 5.0 horas.

A experiência foi desenvolvida de maneira idêntica a anterior até a etapa c, e em seguida foram realizadas as etapas:

- d - retirada do forno de ressecagem e imediata transferência para estufa a 423K (150°C).
- e - retirada da estufa e colocação no "cochicho" com isolamento térmica até atingir a temperatura de 313K (40°C) e pesagem.
- f - colocação dos eletrodos na câmara climatizada já em estado estacionário nas condições estabelecidas de temperatura e umidade relativa. Foram colocadas 12 unidades, sendo duas amostras para cada tempo de exposição;
- g - elaboração dos gráficos com os resultados obtidos.

As seguintes observações devem ser ressaltadas quanto ao desenvolvimento das experiências para avaliação do teor de umidade absorvida:

- 1 - nos testes em câmara climatizada, bem como os realizados ao ar livre, os eletrodos foram transportados até o local de pesagem no "cochicho" de PVC com proteção de sílica-gel, citado no capítulo 3.1.1, objetivando manter inalterada a umidade do eletrodo;
- 2 - o transporte dos eletrodos do forno de ressecagem até a câmara climatizada foi

feito em "cochicho" descrito em 3.1.1, objetivando manter inalterada a umidade de eletrodo e garantindo que os eletrodos fossem colocados na câmara à temperatura bem próximo à da câmara;

- 3 - todos os ensaios foram realizados à pressão atmosférica local;
- 4 - o teor de umidade relativa absorvida é a relação entre a diferença de peso do eletrodo na condição ressecado e após exposição e o peso médio do revestimento;
- 5 - o teor de umidade contida foi obtido pela soma do teor de umidade contida em eletrodos ressecados com o teor de umidade relativa absorvida;
- 6 - o peso médio dos revestimentos foi obtido do valor médio de uma amostragem de 12 unidades, escolhidas aleatoriamente, para cada tipo de eletrodo. Este peso médio foi calculado pela média das diferenças entre o peso bruto e alma dos eletrodos. Um confronto entre o cálculo feito pela média e o valor real e individual de cada eletrodo apresentou apenas uma variação centesimal, não expressando erro significativo;
- 7 - os eletrodos foram introduzidos na câmara climatizada, a uma temperatura de 313K (40°C), para se evitar condensação de água na superfície dos revestimentos /30/. Isto certamente ocorreria, caso fossem introduzidos "frios", ou seja, à temperatura ambiente 296K (23°C). Esta condensação iria provocar mascaramento nos resultados dos ensaios, tendo em vista o eletrodo apresentar ganho de peso não só por higroscopicidade mas também por absorção. Salienta-se que para umidades relativas mais elevadas o caso tornar-se-ia mais crítico, porque a temperatura da câmara estaria mais próxima daquela que iria caracterizar o ponto de orvalho;
- 8 - para cada condição foram ensaiados dois eletrodos para se obter uma média que

proporcionasse maior confiabilidade aos resultados obtidos;

- 9 - os valores das temperaturas dos ensaios com eletrodos expostos ao ar livre, correspondem a média diária do local da exposição;

3.2 - TRINCAS A FRIO CAUSADAS PELO HIDROGÊNIO

3.2.1 - Materiais e Equipamentos

O metal de base utilizado na confecção dos corpos de prova TEKKEEN foi aço carbono de baixa liga, de classificação ASTM A 516 gr 65 fabricado pela Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA), muito utilizado na fabricação de vasos de pressão. Os eletrodos foram do tipo básico, classificação AWS E 8018 e E 10018, iguais aos utilizados na avaliação de absorção de umidade. A composição química, propriedades mecânicas do metal depositado e metal de base, segundo os fabricantes, estão apresentadas nas tabelas 3.1 e 3.2. Na prática, o eletrodo E 10018, não é muito aplicado na soldagem do aço em estudo, porém, foi aqui utilizado para avaliação da susceptibilidade de trincas a frio no metal de solda porque tem maior limite de resistência sendo, portanto, mais susceptível à estas trincas.

Os equipamentos empregados para realização dos ensaios foram os seguintes:

- máquina para solda elétrica BAMBOZZI (300 A/80 V) com variação contínua de corrente.
- máquina oxi-acetilênica de corte (tartaruga) - MC 46.
- plaina limadora.
- esmeril de bancada.
- serra eletro-mecânica.
- forno tipo mufla para ressecagem, marca QUIMIS, com câmara de 0.16 x 0.16 x 0.35m, temperatura máxima de 1473K (1200°C) e precisão de ± 5 graus à 673K (400°C), potência 2.5 kw.

- estufa fabricada pela TERMOSOLDA LTDA, com câmara cilíndrica de \varnothing .30 m de diâmetro e 1.20 m de comprimento, temperatura ajustável de 323 a 573K (50 a 300 C), potência 1.0 kw.
- balança eletro-mecânica SARTORIS 2474 com precisão de \varnothing .01mg.
- registrador gráfico potenciométrico, marca EGB, modelo RB 101, com as seguintes especificações técnicas:
 - . tempo de resposta: 1 seg.
 - . faixas de medição para CC: (1;2;3;10;20;50;100;200;500 mV; 1 e 2 V).
 - . precisão do divisor: \pm 0.1%
 - . linearidade: \pm 0.1%
 - . sensibilidade: \pm 0.1% da faixa selecionada.
 - . velocidade do arraste do papel: 24 velocidades (1;2;3;4;5;6;10;12;15;20;30; 60 cm/min e cm/h).
- escova de aço rotativa.
- máquina cut-off marca PRAZIS.
- cochicho de PVC, revestido internamente com folha de alumínio e isolado termicamente com lã de quartzo.
- planímetro 455 fabricado pela K + E KEUSSEL & ESSER CO.

3.2.2 - Métodos

O corte das chapas para preparação dos corpos de prova TEKKEK, foi realizado com máquina oxi-acetilênica de corte (tartaruga) e serra eletro-mecânica seguindo a padronização das medidas mostradas na figura 2.4. O chanfro em Y foi feito com plaina limadora, e os chanfros em duplo V foram confeccionados por esmerilhamento.

Antes da aplicação da solda de restrição, o

chanfro foi limpo para retirada da oxidação e outras impurezas, fazendo-se uso de uma escova de aço rotativa. Para manutenção do alinhamento e distância prevista entre placas, por ocasião da solda de restrição, usou-se o gabarito mostrado na figura 3.2. A solda de restrição foi realizada com eletrodos de classificação AWS E 7018 ressecados a 673K (400°C) por duas horas.

Após os preparativos, os corpos de prova foram desengraxados com solventes e submetidos à solda de teste. Para isso regulou-se a máquina de solda para a corrente desejada (135 A) medindo-se posteriormente a tensão de trabalho (20 V). Como estes parâmetros foram fixados, o aporte de calor ficou na dependência da velocidade de formação da solda de testes. Devido ao diâmetro relativamente pequeno dos eletrodos (3.25 mm), houve necessidade em alguns ensaios de se reduzir a amperagem a fim de conseguir-se uma menor velocidade para a formação da solda de teste. A utilização de um "shunt" de 200 A/60 mv possibilitou o uso de equipamentos destinados a medição de vários parâmetros. Para verificação do valor da corrente utilizou-se um registrador gráfico potenciométrico e um mili-voltímetro de 60 mV, calibrado como amperímetro. O mesmo registrador serviu para calcular o tempo de aplicação da solda de teste. Para maior confiabilidade nos resultados, um cronômetro digital foi também empregado como equipamento auxiliar. A medição da tensão de trabalho foi feita com um multi-teste de precisão aplicado ao circuito, utilizando-se a faixa de medição de tensão. O esboço deste circuito pode ser visto na figura 3.3 e um exemplo de medição com registrador gráfico potenciométrico, é mostrado na figura 3.4. O aporte de calor foi calculado através da fórmula que segue.

$$H_i = f \frac{V I}{v} \cdot 10^2$$

sendo: H_i - aporte de calor em kJ/mm;

V - tensão elétrica em volts;

I - corrente elétrica em ampères;

v - velocidade de soldagem em mm/s;

f - eficiência de transferência de calor (geralmente maior que 0.8, frequentemente próximo a 1.0).

A umidificação dos eletrodos para testes, foi conseguida por exposição ao ar livre, com o acompanhamento diário para verificação do ganho de peso, de maneira similar ao adotado

para a avaliação do índice de absorção de umidade descrita anteriormente.

Decorrido o tempo previsto para formação e propagação de todas as trincas (48 horas) /23/, os corpos de prova que trincaram foram selecionados e seccionados. O seccionamento transversal da solda de teste, foi feito em oito seções de 10mm cada, como mostra, a figura 2.5. Este corte transversal foi realizado em uma máquina cut-off. As seções foram lixadas até a lixa nº 180 e atacadas com reagente Nital a 3% para melhor identificação, observação e medição das trincas e áreas fundidas.

Para o cálculo do CMT, desenhou-se em papel transparente o contorno da área fundida de cada seção que se obteve com o corte transversal do cordão de solda. Para a medição das áreas usou-se um planímetro e o comprimento da trinca foi obtido com o auxílio de uma linha de comprimento conhecido onde uma das extremidades foi colada à figura seguindo o contorno da trinca. Depois de cortada a linha, por diferença de valores, obteve-se o comprimento da porção que permaneceu colada. Aplicando-se estes dados à equação (I) do capítulo 2.3.3 calculou-se os CMT.

3.3 - ANÁLISE METALOGRAFICA

3.3.1 - Materiais e Equipamentos

Para análise quantitativa da microestrutura do metal de solda, foram selecionadas amostras da região central dos corpos de prova.

Além dos equipamentos convencionais utilizados no corte lixamento e polimento, foram utilizados:

- Microscópio ótico da marca OLIMPUS modelo MO-3;
- Banco metalográfico da marca CARLZEISS, modelo NEOPHOT 30.

3.3.2 - Métodos

As amostras foram embutidas a frio, utilizando-se

resina acrílica. O lixamento foi feito em lixadeira motorizada, com lixas d'água obedecendo a seguinte sequência: n^o 180, 240, 320, 500 e 600. O polimento foi realizado com politriz motorizada, utilizando-se como abrasivo alumina 1 e 0.3 microns. Em seguida foram atacadas por imersão durante 5 segundos, em reagente químico (Nital a 2%). As análises quantitativas foram feitas empregando a técnica de contagem direta de pontos, em observação direta no microscópio, conforme a orientação do IIW - IX - 1533 - 88 /18/. Assim, os constituintes presentes na microestrutura foram quantificados, na seção planar da amostra, pela sobreposição de pontos sistemáticos sobre sua superfície. Em cada amostra foram contados 1000 pontos.

TABELAS E FIGURAS DO CAPITULO

3

TABELA 3.1 - Composição química percentual em peso do metal de base e de adição.

	C	S	P	Si	Mn	Mo
METAL DE BASE	0.250	0.006	0.200	0.920		
AWS E 10018	0.10			0.45	1.75	0.35
AWS E 8018	0.08			0.35	1.45	

NOTA - As análises foram fornecidas pelos fabricantes /28/ /29/.

TABELA 3.2 - Dados gerais do metal de base e de adição.

	METAL DE ADIÇÃO		METAL DE BASE
CLASSIFICAÇÃO (AWS/ASTM)	E 10018	E 8018	A 516 GR-65
DIÂMETRO/ESPESSURA - (mm)	3.25	3.25	20.64
COMPRIMENTO (mm)	350	350	-
AMPERAGEM RECOMENDADA (A)	140	140	-
LIMITE DE RESISTÊNCIA (N/mm ²)	680/750	550/630	450/585
ALONGAMENTO (%) L = 5 D	18	24	19
LIMITE DE ESCOAMENTO (N/mm ²)	-	-	240
RESILIÊNCIA (chv - 5)	170(-20°C) 170-70(-20°C)		-

NOTA - Dados fornecidos pelos fabricantes /28/ /29/.

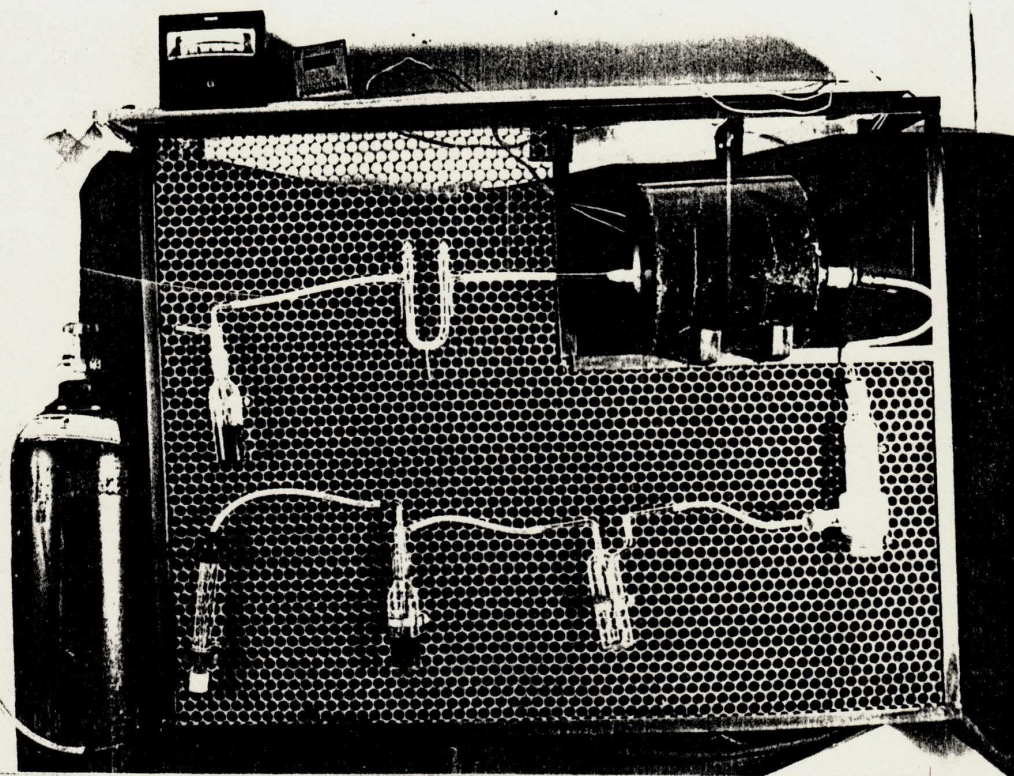


FIGURA 3.1 - Equipamento para determinação de umidade do revestimento.

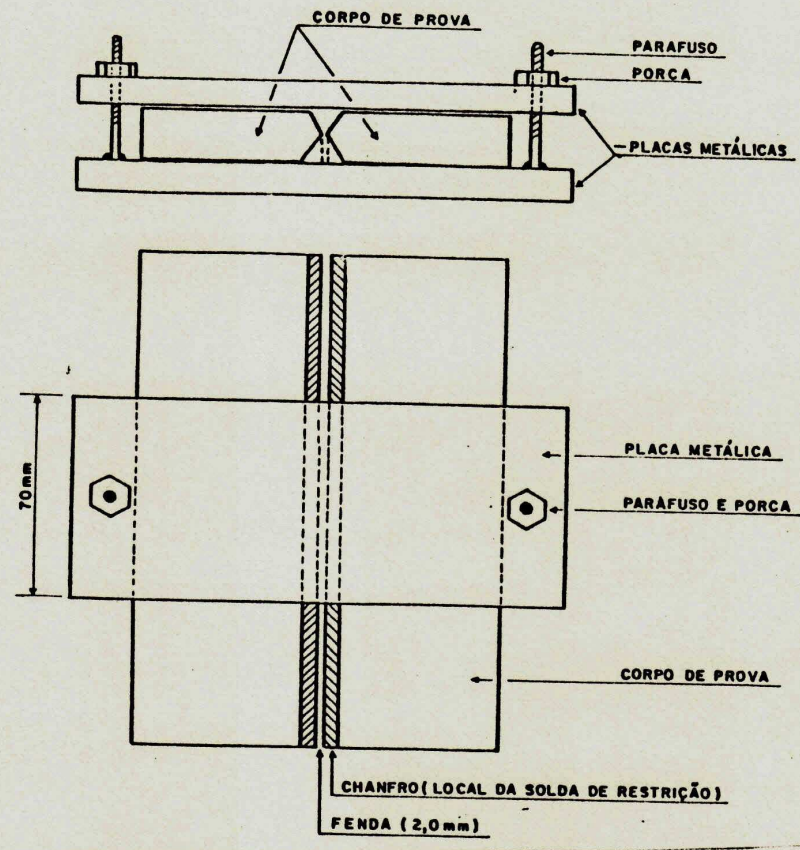


FIGURA 3.2 - Gabarito para nivelamento do corpo de prova durante a aplicação da solda de restrição.

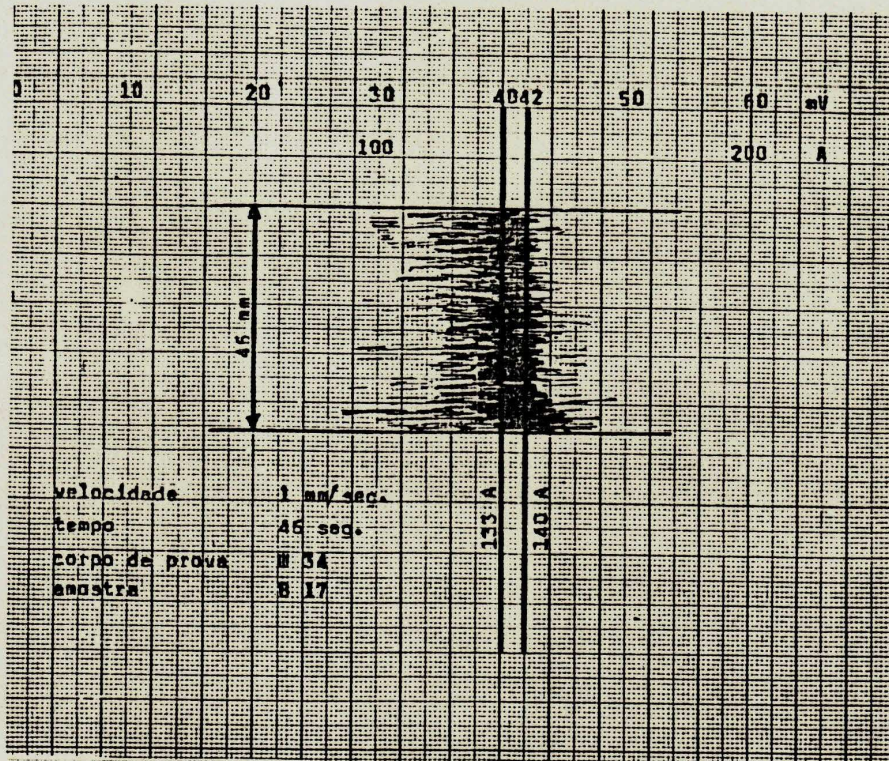


FIGURA 3.3 -- Equipamento para solda a arco elétrico -
Esquema para cálculo da corrente, tensão e
tempo de soldagem.

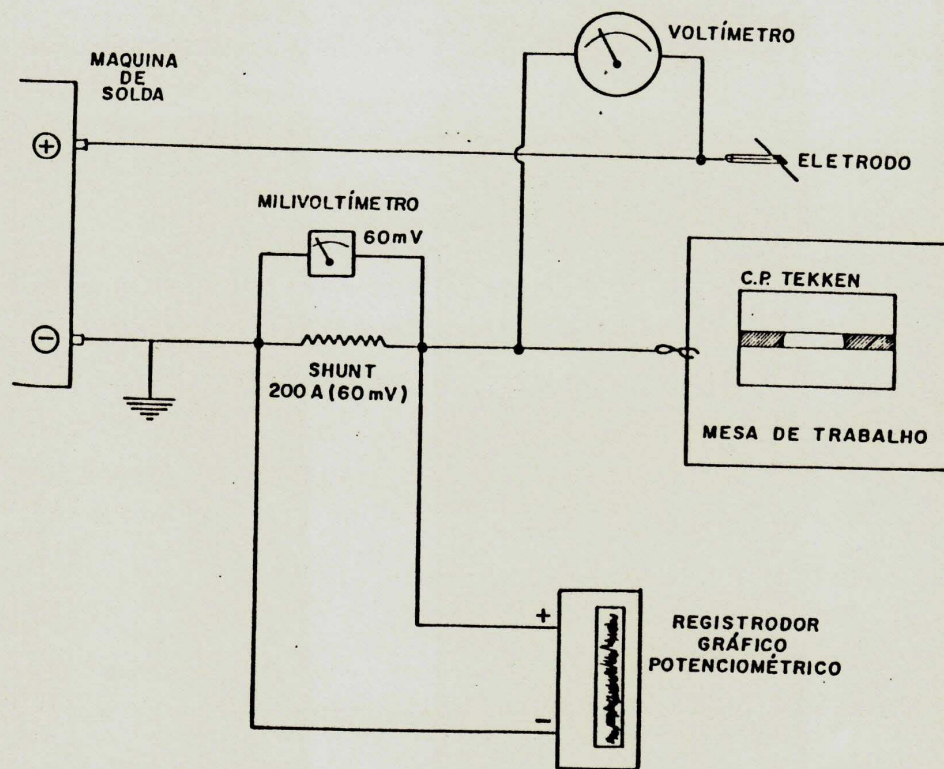


FIGURA 3.4 - Exemplo de cálculo de amperagem e tempo de soldagem utilizando-se aparelho Registrador Gráfico Potenciométrico.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 UMIDADE CONTIDA NO REVESTIMENTO DOS ELETRODOS

A tabela 4.1 apresenta os resultados dos ensaios de avaliação da umidade contida nos revestimentos dos eletrodos AWS E 10018 e E 8018. A norma AWS A 5.5- 81 /11/ define que para o eletrodo AWS E 8018 o teor de umidade na condição de fabricado não deve ser superior a 0.2% e, após sua exposição atmosférica não deverá exceder a 0.4%. Para o eletrodo E 10018 na condição de fabricado não deve ser maior que 0.15% e, após sua exposição atmosférica, inferior a 0.2%. Os resultados de 0.34% para o AWS E 8018 e 0.19% para o AWS E 10018 estão dentro desses limites normalizados.

4.2 ABSORÇÃO DE UMIDADE

4.2.1 - Absorção de Umidade por Exposição ao Ar Livre - A figura 4.1 mostra os resultados dos ensaios realizados com eletrodos AWS E 8018 e E 10018 que permaneceram expostos ao ar livre por um período de 35 dias. Verificou-se neste intervalo uma variação dos parâmetros meteorológicos locais, onde a umidade relativa variou na faixa de 75 a 97% e a temperatura de 294 a 298K (21 a 25°C). Os valores médios para o período foram de 86% de umidade relativa e 296K (23°C) de temperatura, estando estes valores coerentes com os da tabela 4.2. Esta tabela retrata as condições meteorológicas do município de Campina Grande-Pb, para os últimos dez anos, levantados pelo Centro Nacional de Pesquisa do Algodão-CNPA /4/, cujo nível de temperatura foi de 296K (23 C) e o de umidade relativa 78%. Comparando-se esta média com as condições impostas pela norma AWS A 5.5 - 81, para armazenamento de eletrodos básicos em ambiente normal $303 \pm 10K$ (30 ± 10^0 C) de temperatura e 50% de umidade relativa, constata-se uma grande diferença entre a realidade regional e os valores normalizados.

Neste trabalho, a verificação da umidade absorvida foi feita pelo teor de umidade total, isto é, o somatório entre a umidade absorvida e a umidade residual observada no revestimento dos eletrodos. Assim sendo, pode ser feita uma comparação direta com os níveis máximos de umidade absoluta especificados pela norma AWS A 5.5 - 81 (0.2% para o eletrodo E 8018 e 0.15 para o E 10018) e os resultados aqui obtidos. Com o objetivo de obter-se uma umidade residual relativamente baixa, optou-se por uma ressecagem a 673K (400°C) por 2 horas /3/. Essa ressecagem

foi feita antes da exposição dos eletrodos e também para o teste de obtenção de umidade residual. Os resultados apresentados na figura 4.1 mostram o quão crítica é a absorção da umidade pelos revestimentos dos eletrodos básicos estudados, os quais atingiram, em condições meteorológicas regionais, níveis de umidade total bem acima dos limites normalizados.

Deve-se observar que as condições de exposição utilizadas no presente trabalho são mais severas que aquelas verificadas nas oficinas onde os eletrodos, embora em contato com o ar, são armazenados empilhados e não isolados, como na presente experiência.

Para os dois eletrodos estudados observou-se um aumento na umidade total com o tempo de exposição. Após o trigésimo dia a curva tendeu para um patamar, indicando talvez, uma saturação da umidade nos revestimentos. O aumento brusco na umidade relativa, com uma correspondente queda de temperatura, no 19º e 27º dia, acarretou um aumento, também brusco, de umidade total por ambos os eletrodos. Com o retorno da umidade a níveis normais, um decréscimo na umidade total também foi observado, sendo porém, em níveis superiores àqueles que vinham sendo observados antes dos picos. Essa rápida absorção, seguida de uma também rápida evaporação da umidade, indica certamente tratar-se de uma água absorvida que se transforma em água cristalizada, aumentando com o tempo, ajudando a manter as curvas em ascensão até a saturação /31/.

4.2.2 - Umidade Absorvidas em Câmara Climatizada -
Os níveis de umidade total absorvida pelos eletrodos, nas várias condições de temperatura e umidade relativa, são mostrados nas figuras 4.2 a 4.5. As figuras 4.2 e 4.3 mostram o efeito da temperatura sobre a umidade total absorvida pelos eletrodos AWS E 8018 e E 10018 respectivamente, em função do tempo de exposição para umidade relativa de 80%. Nas figuras 4.4 e 4.5 a temperatura da câmara foi fixada em 333K (60°C) para se observar o efeito da umidade total absorvida. Essa temperatura foi fixada em função das características do equipamento utilizado.

Os gráficos construídos evidenciam que, para estes eletrodos, a taxa de absorção de umidade tende a aumentar com o aumento da temperatura e/ou umidade de ensaio. A taxa de absorção de umidade aumenta consideravelmente o seu valor com o aumento de apenas 10 graus na temperatura. Esta situação torna-se mais crítica quão maior for a temperatura. O mesmo acontece quando a umidade relativa é variada.

Os ensaios correspondentes às figuras 4.2 e 4.3 foram realizados num nível de umidade semelhante à média da região de Campina Grande-PB, ou seja 80%. Nestes ensaios os resultados demonstram que, com poucos minutos, os limites normalizados são atingidos e que este tempo diminui com o aumento de temperatura. Isto representa um alerta para uma prática normal em certas oficinas de soldagem que armazenam eletrodos em locais aquecidos inadequadamente, sem a preocupação devida com a umidade do ambiente. Dependendo da temperatura utilizada, este costume pode levar a um maior nível de umidade aos revestimentos dos eletrodos, sendo, desta maneira preferível estocá-los ao ar livre.

Um fato comum observado pelos soldadores em dias de umidade relativa alta, por exemplo dias chuvosos, é a má qualidade das juntas soldadas. Este fato pode claramente ser previsto e explicado pelo alto percentual de umidade total absorvida pelos revestimentos, quando da variação da umidade relativa do ar observada no 19º e 27º dia para eletrodos expostos a ambiente natural e para eletrodos submetidos à câmara climatizada com umidade relativa variando de 60 a 90%.

A diferença nas taxas de absorção de umidade total absorvida entre os dois tipos de eletrodos quando submetidos às mesmas condições de exposição (as ambientais e câmara úmida), pode ser devido às diferenças na composição química dos revestimentos, e à possíveis diferenças na granulometria, grau de compactação, umidade inicial e/ou espessura do revestimento.

4.3 - TRINCAS A FRIO CAUSADAS POR HIDROGÊNIO

A tabela 4.3 apresenta os resultados dos ensaios TEKKEN realizados com o eletrodo AWS E 8018 e a figura 4.6 apresenta estes resultados em gráficos de umidade total absorvida versus aporte de calor.

No eletrodo E 8018, nas condições de umidade absorvidas no presente trabalho (0.34 - 2.7%) com o aporte de calor variando na faixa de 0.84 a 2.09 kJ/mm, não foi verificado a presença de trincas a frio, mesmo nas condições mais críticas que foi 2.7% de umidade total absorvida e 0.84 kJ/mm de aporte de calor (amostra A16 da tabela 4.3).

Considerando que o nível máximo de umidade total aplicado no ensaio TEKKEN corresponde ao nível de saturação encontrado na exposição ao ar livre, após 35 dias, conclui-se que

nas condições experimentais utilizadas no presente trabalho não se deve esperar problema de trinca a frio tendo como causa a umidade no revestimento, que por sinal, seria um dos fatores mais significativos para o aparecimento deste defeito.

A tabela 4.4 apresenta os resultados dos ensaios TEKKEN para eletrodos AWS E 10018, assim como uma do CMT para as amostras trincadas. A figura 4.7 apresenta esses resultados em gráficos de umidade total versus aporte de calor. A figura 4.8 mostra, numa seção transversal de um corpo de prova, uma trinca a frio, causada por hidrogênio, observada no presente trabalho.

Para as condições de baixa umidade total, isto é, menor que 0.86% (amostra B1 a B11 da tabela 4.4), trincas foram observadas somente quando o aporte de calor foi menor que 1.05 kJ/mm, sendo que o CMT variou de 0.0098 até 0.109 1/mm.

Para as condições de média umidade, isto é, na faixa de 1.39 a 1.82% (amostras B12 a B17 da tabela 4.4), trincas foram observadas somente quando o aporte de calor foi menor que 1.35 kJ/mm, com o CMT variando de 0.097 a 0.114 1/mm.

Para as condições de alta umidade total, isto é, de 2.16 a 2.71% (amostras B18 a B21 da tabela 4.4), trincas foram observadas a partir de um aporte de calor menor que 1.55 kJ/mm, com CMT variando de 0.113 a 0.145 1/mm.

Diante do exposto, verificou-se o aparecimento de trincas a frio em amostras soldadas com eletrodos com alto teor de umidade e/ou baixo aporte de calor, sendo que o CMT é maior quanto mais crítica for a combinação dos dois parâmetros. Estas condições críticas de umidade total e aporte de calor podem ser claramente verificadas, na figura 4.7, por uma faixa limite entre amostras trincadas e não trincadas. Assim, quanto maior for a umidade total, maior deverá ser o aporte de calor para que a possibilidade de aparecimento de trincas seja reduzida. Isto acontece porque uma maior energia de soldagem (ou um tratamento de pré ou após soldagem) tende a reduzir a taxa de resfriamento, reduzindo a possibilidade de formação de constituintes de baixa tenacidade e favorecendo a redução do nível de hidrogênio difusível.

Um aporte de calor mínimo em torno de 1.6 kJ/mm, foi necessário para que trincas a frio fossem evitadas, mesmo para aqueles ensaios realizados com eletrodos ressecados.

4.4 - ANÁLISE QUANTITATIVA DA MICROESTRUTURA

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam também os resultados quantitativos da classificação dos constituintes microestruturais do metal de solda, por microscopia ótica, conforme a orientação IIW Doc Ng 1533 - 88 /18/, para os corpos de prova soldados com eletrodos AWS E 8018 e E 10018 respectivamente. Os constituintes encontrados nesta análises quantitativa foram os seguintes: Ferrita de Contorno de Grão-PF(G), Ferrita Poligonal Intergranular-PF(I), Ferrita de Segunda Fase Alinhada-FS(A), Ferrita de Segunda Fase Não-Alinhada-FS(NA) e Ferrita Acicular-AF.

A ausência de trincas nos corpos de prova soldados com o eletrodo AWS E 8018 pode ser explicada, segundo a ótica da análise quantitativa dos microconstituintes presentes, da seguinte forma: Observou-se a presença de um percentual bastante representativo de AF, que é o constituinte mais desejável por conferir mais tenacidade à junta soldada e porque a propagação de trincas em suas colônias é frequentemente frejada ou obrigada a mudar de direção, dado ao alto ângulo existente entre as suas subcélulas; observou-se também pequenas percentagens de PF(G), que é considerada sítio de nucleação das trincas, por ser bastante macia e por estar circundada por microestrutura de maior resistência /19,20/.

A análise quantitativa para os corpos de prova soldados com eletrodos AWS W 10018 mostrou existir diferenças nas quantidades de AF e PF para amostras trincadas e não trincadas, como mostra a tabela 4.4. Observando-se amostras com o mesmo teor de umidade total, como é o caso das amostras B19 e B20, B5 e B8 e a B9 e B10, nota-se um menor percentual de PF nas amostras não trincadas, mostrando o quanto é danoso para a junta soldada a presença de PF, mesmo em percentuais considerados baixos.

TABELAS E FIGURAS DO CAPITULO

4

ELETRÓDOS	B (g)	1º TESTE			2º TESTE			3º TESTE			UNIDADE
		H (g)	PESO DA AMOSTRA (g)	UNIDADE (%)	H (g)	PESO DA AMOSTRA (g)	UNIDADE (%)	H (g)	PESO DA AMOSTRA (g)	UNIDADE (%)	MEDIA (%)
AWS											
E 8018	0.0703	0.0934	3.9735	0.38	0.0879	4.0235	0.29	0.0923	3.9885	0.35	0.34
AWS											
E 10018	0.0703	0.0857	4.0215	0.19	0.0865	4.1231	0.20	0.0857	3.8935	0.19	0.19

TABELA 4.1 - Resultado do ensaio de unidade contida no revestimento dos eletrodos

AWS E 8018 e E 10018 após ressecamento a uma temperatura de 673K

(400°C) por 2 horas.

TEBELA 4.2 - Dados Meteorológicos do Município de Campina Grande - Pb - /4/.

ANOS	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
MESES	°C UR(X)	°C UR(X)	°C UR(X)	°C UR(X)	°C UR(X)	°C UR(X)	°C UR(X)	°C UR(X)	°C UR(X)	°C UR(X)
AGOSTO	23.91 81	23.91 78	23.71 75	23.41 76	24.31 73	24.11 71	24.61 71	24.01 73	24.31 75	25.01 70
SETEMBRO	24.01 80	23.81 82	23.71 75	23.61 76	24.01 78	24.71 70	24.01 78	24.61 78	24.31 74	25.21 71
OUTUBRO	24.21 77	23.11 80	23.41 81	23.81 78	24.51 81	25.01 75	23.51 85	23.31 81	24.31 81	24.81 78
NOVEMBRO	23.71 77	23.11 81	22.81 81	24.01 77	23.81 78	23.21 83	- -	23.31 86	23.51 85	23.91 82
DEZEMBRO	22.21 87	22.51 81	22.31 81	22.41 84	22.71 84	22.31 86	22.61 84	22.61 84	23.61 78	22.81 84
JANUÁRIO	20.81 87	21.51 84	21.21 82	21.31 88	21.91 86	21.51 84	21.81 84	21.31 86	22.41 84	22.01 82
FEBRIL	20.51 83	21.21 77	20.21 79	20.91 86	21.41 84	20.81 85	20.81 86	20.91 85	21.61 84	20.91 85
MARÇO	21.01 81	21.41 78	21.11 72	20.91 85	21.21 84	21.11 85	21.21 82	21.11 85	22.31 77	20.81 81
ABRIL	21.51 84	22.61 74	21.91 71	21.71 74	22.41 78	21.91 80	22.01 77	21.61 83	22.61 74	21.81 75
MAIO	22.91 75	22.81 76	23.21 69	22.51 72	22.61 76	23.11 76	23.11 68	22.71 79	23.11 70	23.21 73
JUNHO	23.21 78	23.41 75	23.41 72	23.21 72	23.41 69	23.41 70	23.51 70	23.21 78	24.41 69	23.81 74
JULHO	24.01 72	23.61 76	23.71 77	23.81 78	24.11 70	24.41 69	22.81 73	23.71 76	24.61 69	23.81 75
AGOSTO	22.71 80	22.71 78	22.61 76	22.51 79	23.01 79	23.01 78	22.81 78	22.61 81	23.41 77	23.21 77

OBS. - Os valores das temperaturas correspondem a média das máximas ocorridas no mês.

Ensaio com eletrodos AWS E 8018

ANOETRA	CARACTERÍSTICA DO ARCO ELÉTRICO						UNIDADE	C.H.T.	MICROESTRUTURA				
	CORRENTE (A)	TENSÃO (V)	TEMPO (s)	VELOCIDADE (mm/s)	APORTE DE CALOR kj/mm	TOTAL (%)			(1/mm)	PF(G)	PF(I)	FS(A)	FS(NA)
A1	135	20	25	3.20	0.84	0.34	- 0 -	2.8	1.3	0.8	0.6	94.6	
A2	135	20	40	2.00	1.35	0.34	- 0 -						
A3	135	20	48	1.67	1.62	0.34	- 0 -						
A4	135	20	60	1.33	2.02	0.34	- 0 -						
A5	135	20	40	2.00	1.35	0.74	- 0 -						
A6	135	20	25	3.20	0.84	0.76	- 0 -						
A7	135	20	62	1.29	1.09	0.79	- 0 -						
A8	135	20	40	2.00	1.35	1.44	- 0 -	17.00	0.5	1.1	2.0	79.4	
A9	135	20	25	3.20	0.84	1.46	- 0 -						
A10	135	20	50	1.60	1.69	1.48	- 0 -						
A11	135	20	40	2.00	1.35	2.06	- 0 -						
A12	135	20	54	1.48	1.92	2.08	- 0 -	3.1	1.3	1.3	2.4	91.9	
A13	135	20	25	3.20	0.84	2.14	- 0 -	4.8	0.9	1.3	1.4	91.1	
A14	135	20	62	1.29	2.05	2.16	- 0 -						
A15	135	20	40	2.00	1.35	2.94	- 0 -						
A16	135	20	25	3.20	0.84	3.04	- 0 -						

TABELA 4.3 - Mapa de ensaios

Ensaio com eletrodos AWS E 10018

AMOSTRA	CARACTERÍSTICA DO ARCO ELÉTRICO					UNIDADE	C.M.T.	MICROESTRUTURA					
	CORRENTE (A)	TENSÃO (V)	TEMPO (s)	VELOCIDADE (mm/s)	APORTE DE CALOR kJ/mm			TOTAL (%)	(1/mm)	FF(G)	PF(L)	FS(A)	FS(NA)
B1	135	20	64	1.25	2.16	0.82	- 0 -						
B2	135	20	54	1.48	1.82	0.19	- 0 -						
B3	135	20	50	1.60	1.69	0.83	- 0 -						
B4	135	20	46	1.74	1.55	0.19	- 0 -						
B5	135	20	42	1.50	1.42	0.79	- 0 -	1.5	2.0	0.3	1.5	94.7	
B6	135	20	40	2.00	1.35	0.19	- 0 -						
B7	135	20	36	2.22	1.22	0.77	- 0 -	1.4	1.2	0.9	2.2	94.3	
B8	135	20	32	2.50	1.08	0.19	- 0 -	1.9	1.1	0.8	1.2	95.0	
B9	135	20	25	3.20	0.84	0.19	0.098	9.4	4.6	1.6	2.6	81.6	
B10	135	20	25	3.20	0.84	0.86	0.101						
B11	135	20	67	1.19	2.27	1.74	- 0 -						
B12	135	20	64	1.25	2.16	1.39	- 0 -						
B13	135	20	54	1.48	1.82	1.80	- 0 -						
B14	135	20	46	1.74	1.55	1.56	- 0 -	0.8	3.1	0.4	2.1	93.6	
B15	135	20	40	2.00	1.35	1.82	0.114	1.6	2.0	0.8	2.2	93.4	
B16	135	20	32	2.50	1.08	1.49	0.197						
B17	135	20	65	1.23	2.19	2.61	- 0 -	2.3	3.5	0.4	1.6	92.2	
B18	135	20	54	1.48	1.82	2.71	- 0 -	2.8	6.9	2.8	3.0	84.5	
B19	135	20	46	1.74	1.55	2.69	0.145						
B20	135	20	40	2.00	1.35	2.67	0.113						

TABELA 4.4 - Mapa de ensaios

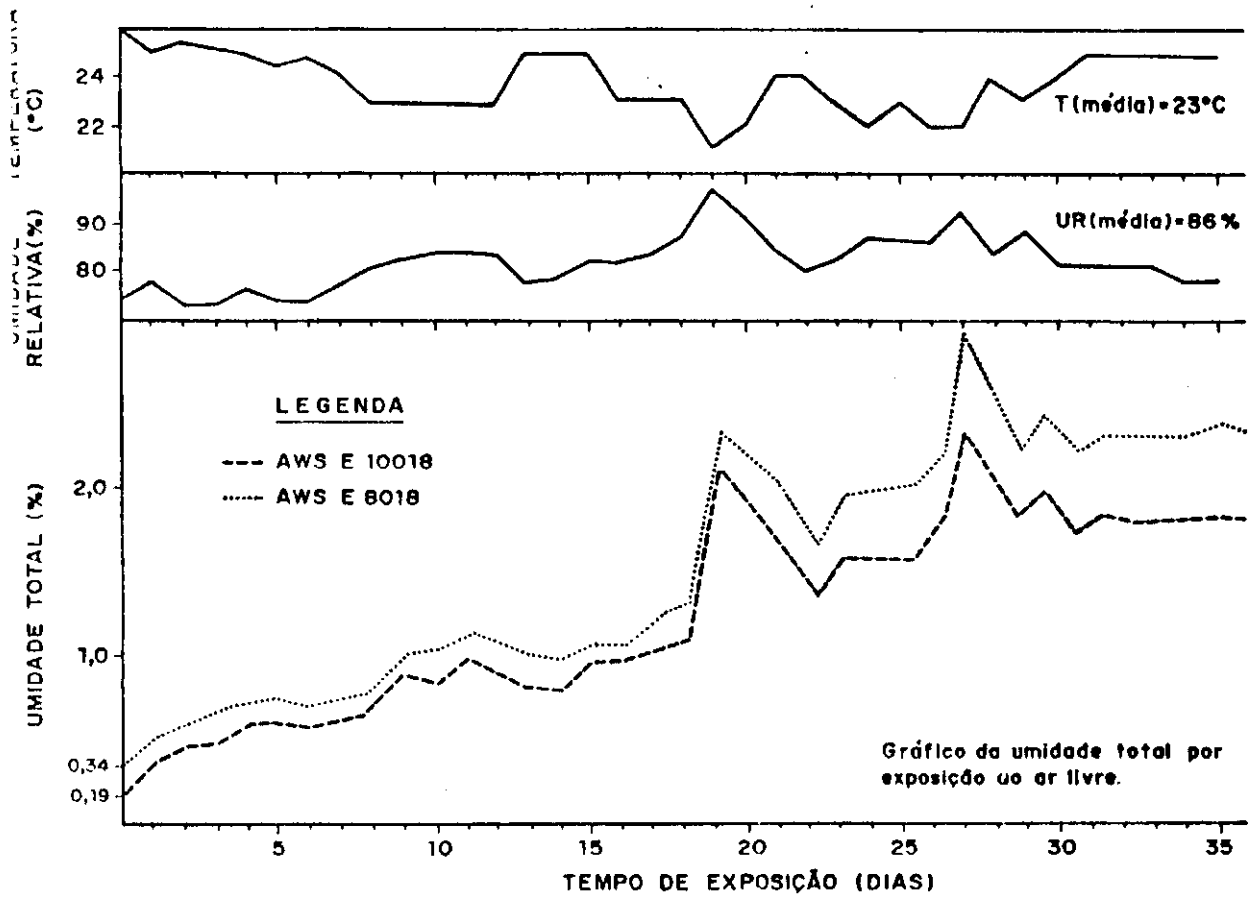


FIGURA 4.1 - Gráfico da umidade total por exposição ao ar livre.

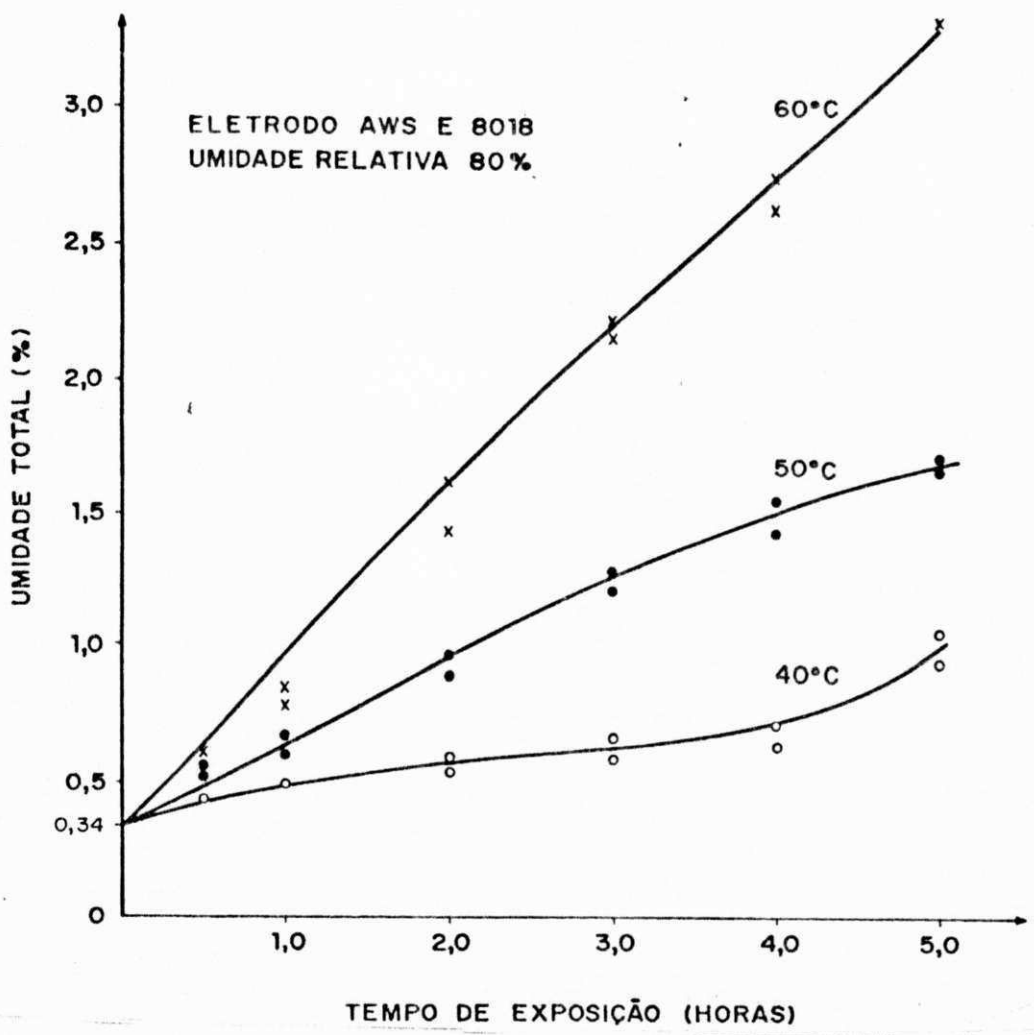


FIGURA 4.2 - Efeito da temperatura sobre a umidade total.

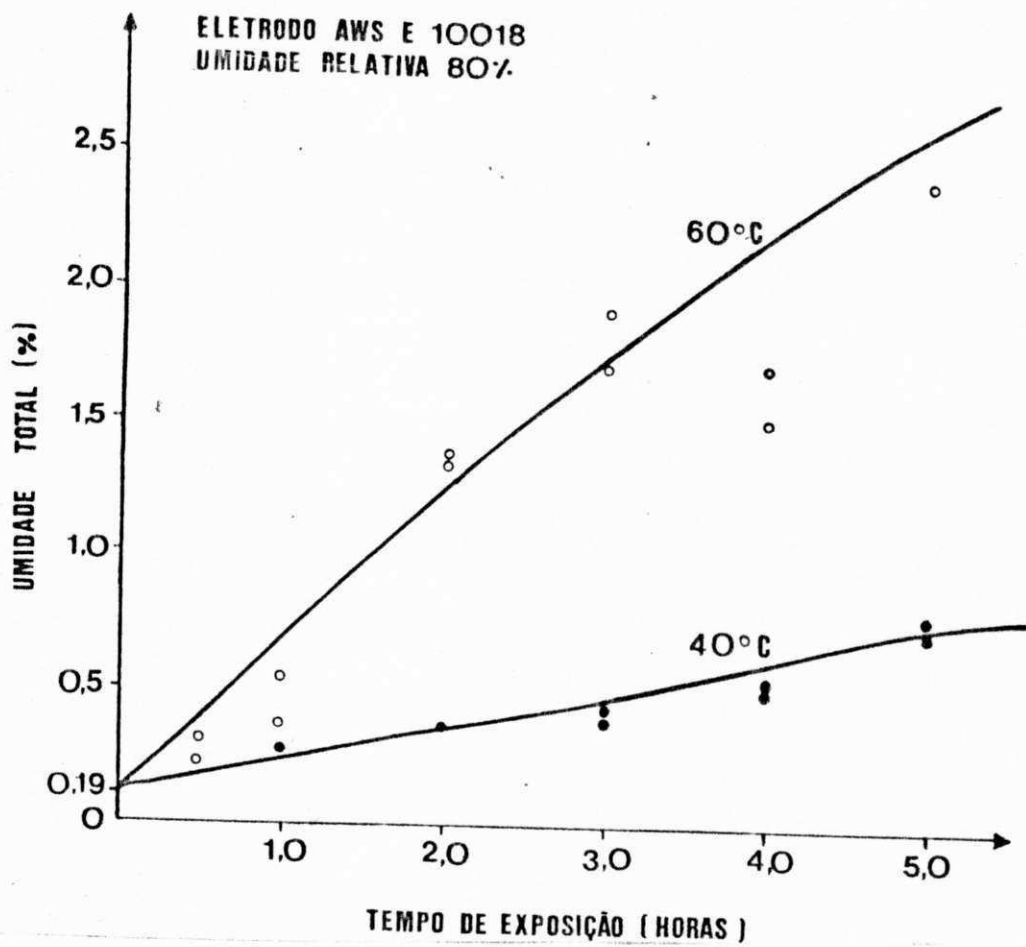


FIGURA 4.3 - Efeito da temperatura sobre a umidade total.

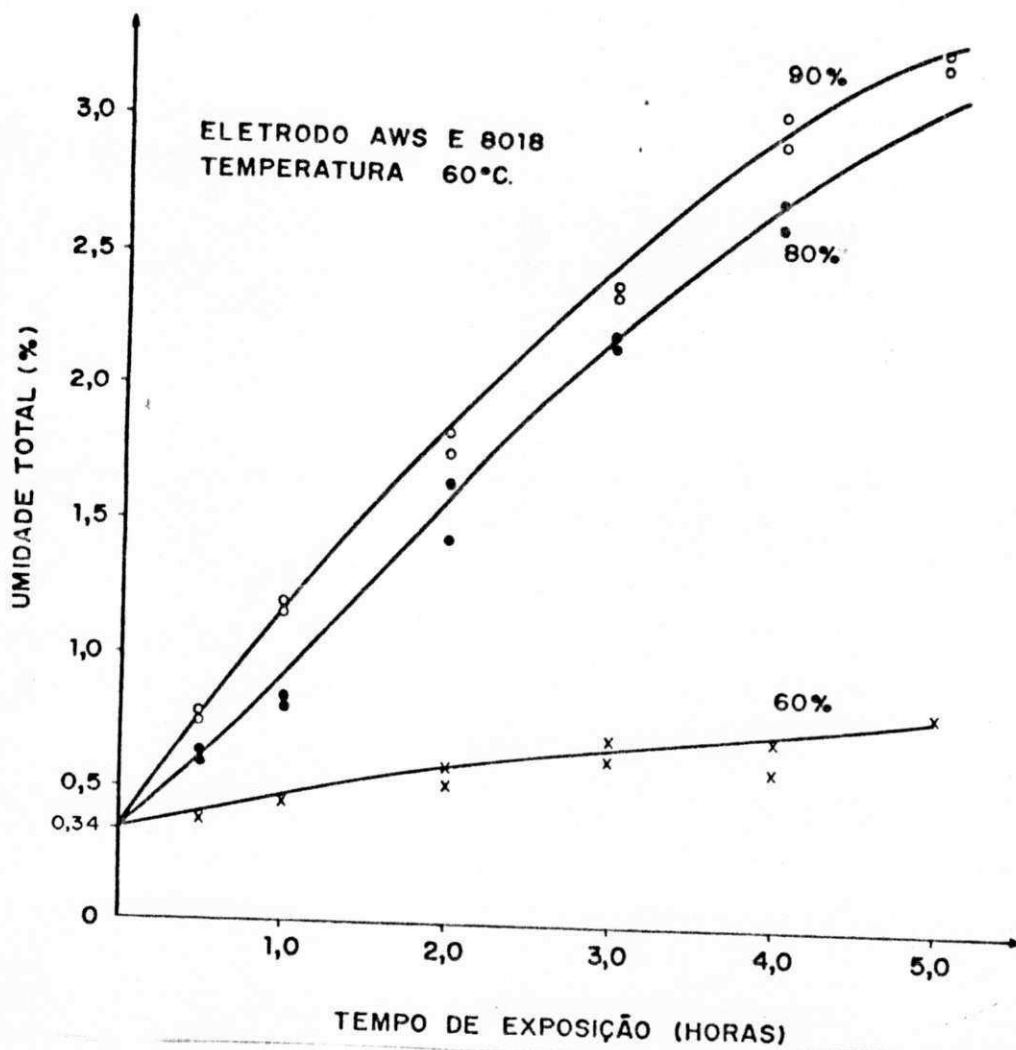


FIGURA 4.4 - Efeito da umidade relativa sobre a umidade total.

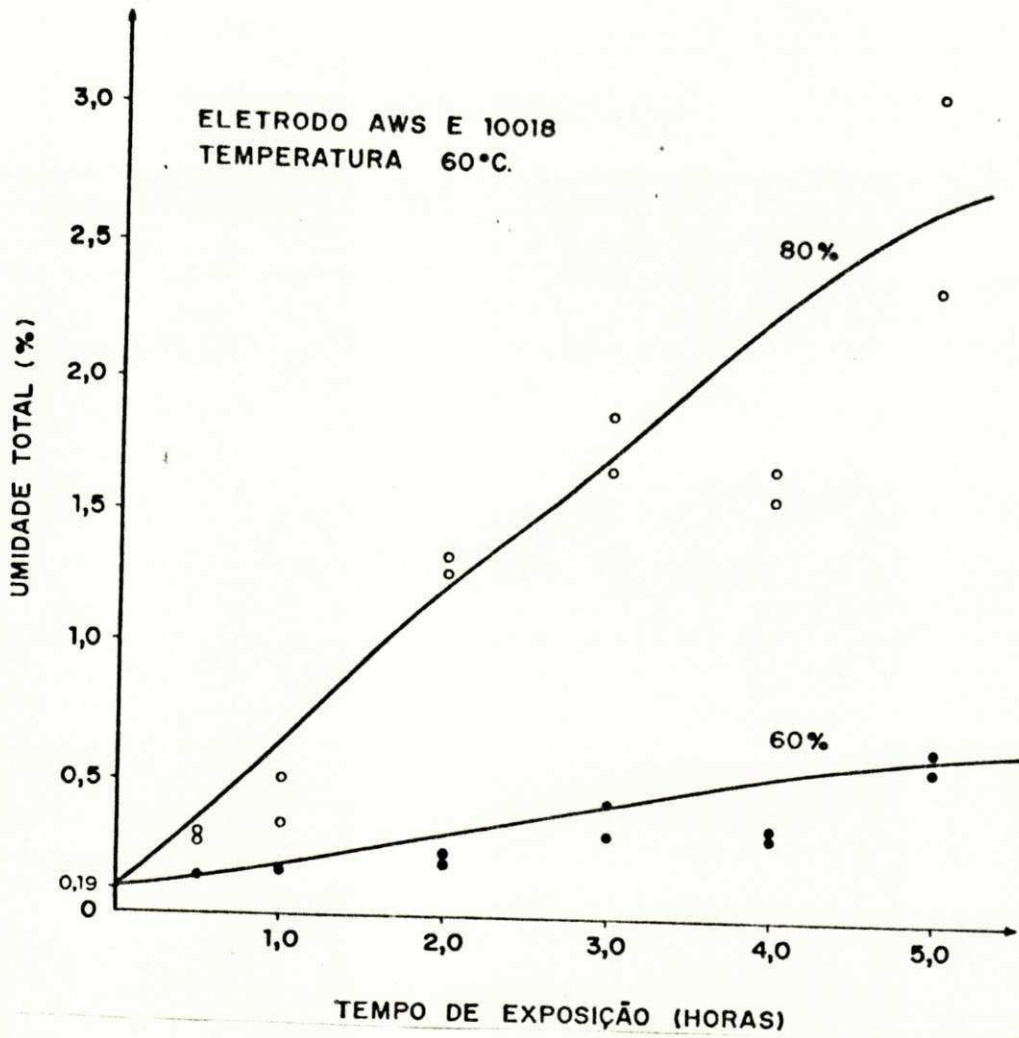


FIGURA 4.5 - Efeito da umidade relativa sobre a umidade total.

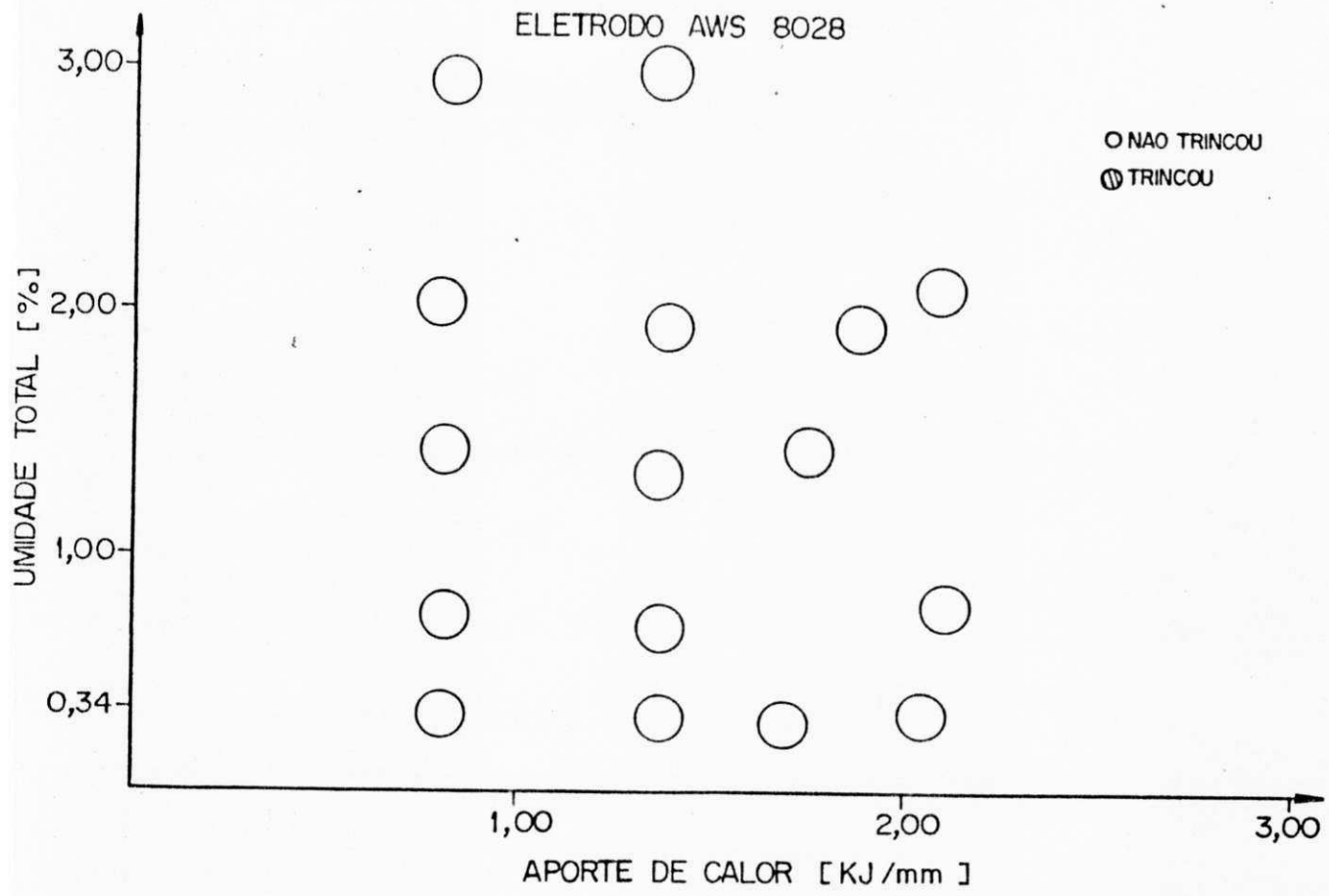


FIGURA 4.6 - Ensaio TEKKEK - verificaçãõ de trincas.

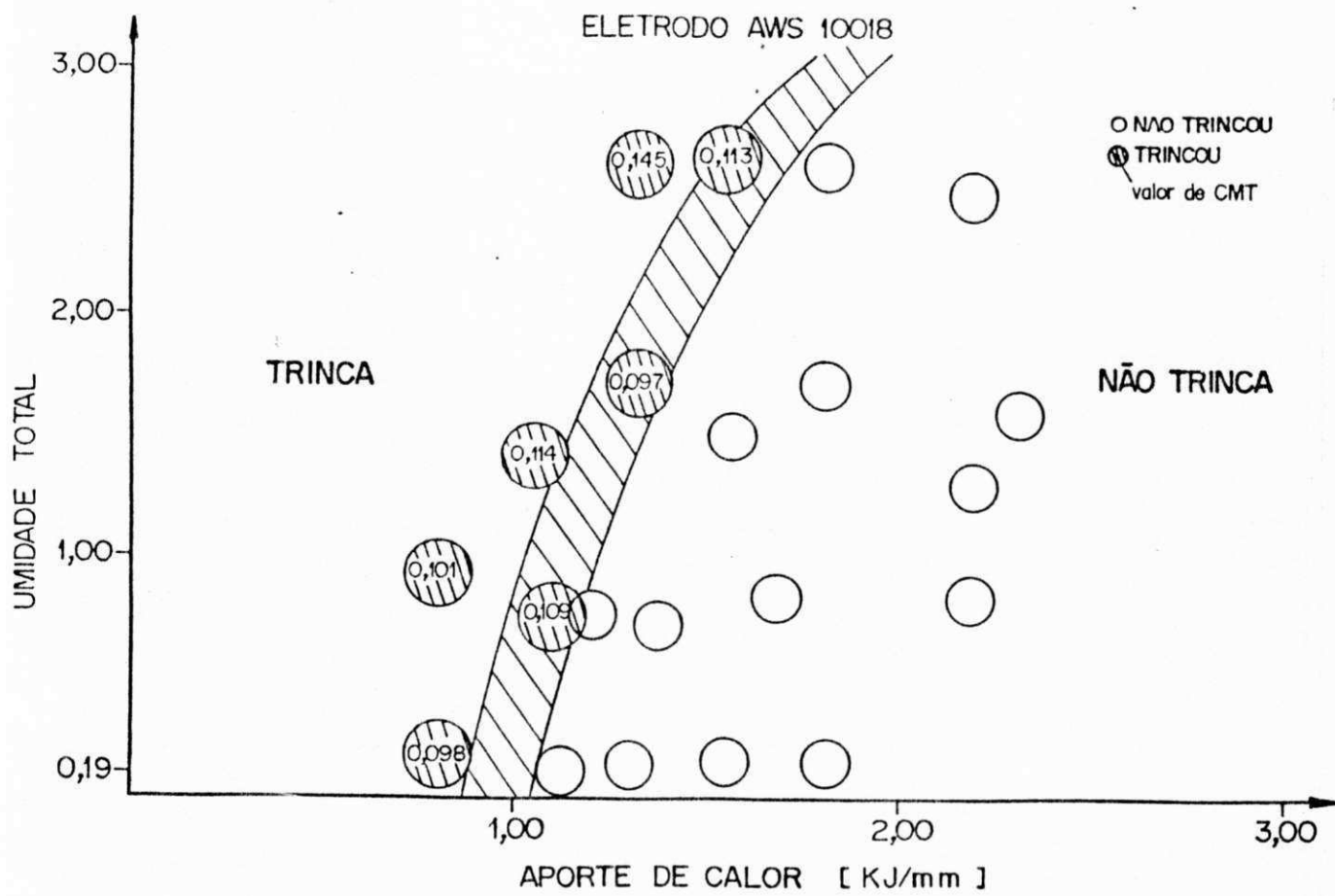


FIGURA 4.7 - Ensaio TEKKEK - verificação de trincas.

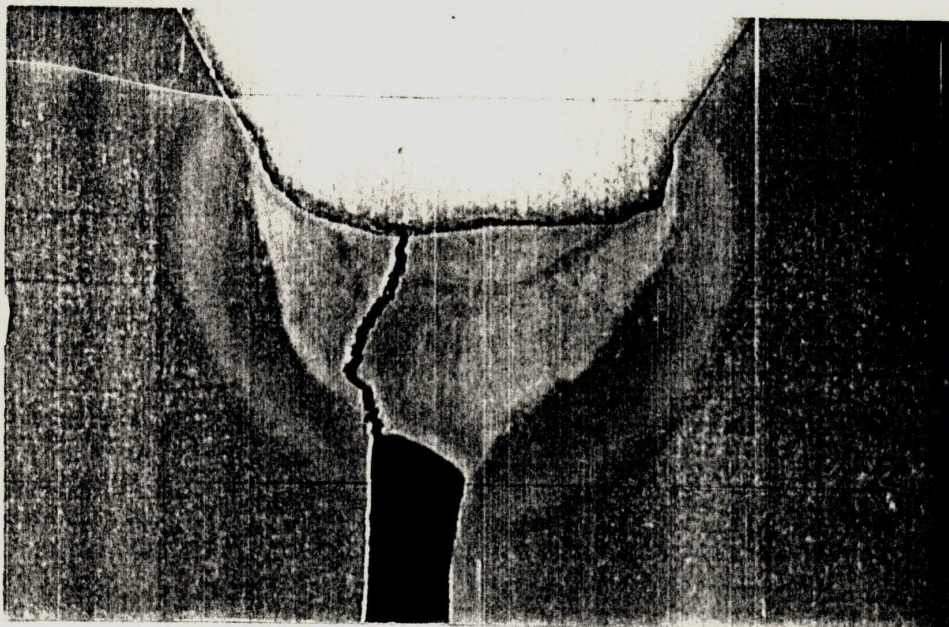
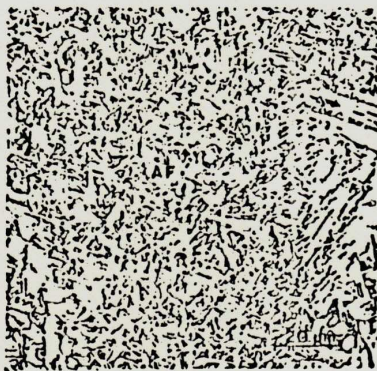


FIGURA 4.8 - Seção transversal do metal de solda com trinca a frio causada por hidrogênio.



MICROESTRUTURAS	
PF(G)	FERRITA DE CONTORNO DE GRÃO
PF(I)	FERRITA POLIGONAL IN-TRAGRANULAR
AF	FERRITA ACICULAR
FS(A)	FERRITA COM 2ª FASE ALINHADA
FS(NA)	FERRITA COM 2ª FASE NÃO ALINHADA

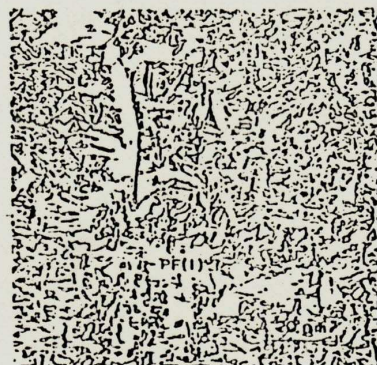
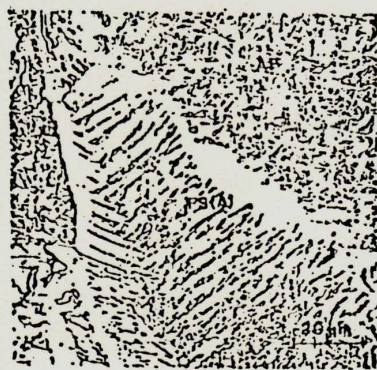
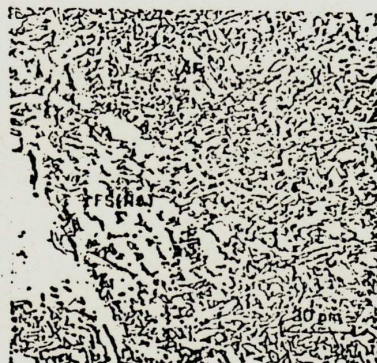
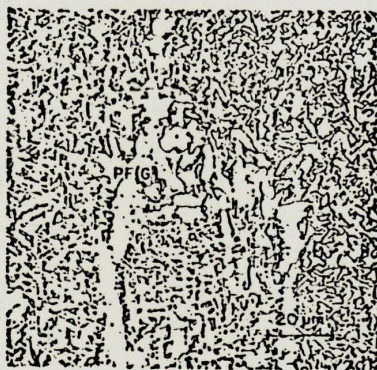


FIGURA 4.9 - Microestruturura do metal de solda.

CONCLUSÕES

- Os eletrodos AWS E 8018 e E 10018 apresentam seus níveis de umidade residual dentro dos limites determinados pela norma AWS A 5.5 - 81, quando ressecados a 673K (400°C) por 2 horas.
- Os eletrodos estudados absorvem rapidamente umidade quando expostos às condições ambientais com temperatura média de 296K (23°C) e umidade relativa média de 86%, atingindo níveis a partir da condição de ressecado, de até 2.5% após 35 dias de exposição.
- Para estes eletrodos, os limites de umidade máxima normalizados são atingidos com a exposição às condições ambientais após algumas horas para o AWS E 10018 e dois dias para o eletrodo 8018.
- A umidade total absorvida pelos revestimentos dos eletrodos estudados aumentam com a temperatura e a umidade relativa do ambiente.
- Para níveis de umidade relativa regional, que é de 80%, e temperatura acima de 313 (40°C), os limites de umidade máxima, normalizados, seriam atingidos após poucas horas de exposição para ambos os eletrodos.
- Os corpos de prova TEKKEN, soldados com eletrodos AWS E 8018, não apresentaram trincas a frio em seu cordão de solda mesmo quando com uma umidade total no revestimento do eletrodo de 3.04% e aporte de calor variando na faixa de 0.84 a 2.09 kJ/mm.
- Apresentam-se trincas a frio no cordão de solda dos corpos de prova TEKKEN, soldados com eletrodos AWS E 10018, quando condições críticas de umidade total e aporte de calor foram utilizadas.
- Um aporte de calor mínimo de 1.6 kJ/mm foi necessário para que trincas a frio fossem evitadas para eletrodos AWS E 10018 ressecados.

- A análise quantitativa dos microconstituintes existentes em corpos de prova soldados com eletrodos AWS E 8018 apresentou alta percentagem de Ferrita Acicular-AF, e quantidade insignificante de Ferrita Primária-PF.
- Nos corpos de prova soldados com eletrodos AWS E 10018, a análise quantitativa apresentou um menor percentual de Ferrita Acicular e um maior percentual de Ferrita Primária em relação as amostras não trincadas e trincadas respectivamente, o que poderia explicar o trincamento dos corpos de prova em determinadas condições de umidade total e aporte de calor.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Da experiência adquirida no desenvolvimento desta dissertação, são aqui sugeridas algumas idéias para futuros trabalhos:

- 1 - Avaliar a influência do teor de hidrogênio e da microestrutura, na formação de trincas a frio na ZTA, utilizando corpo de prova TEKEM com chanfro em Y oblíquo.
- 2 - Fazer uma avaliação do teor de umidade contida no revestimento de eletrodos básicos baixo hidrogênio em função dos parâmetros de ressecagem, temperatura e tempo, e relacionar com os parâmetros normalizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - SILVA, M. L. "Controle de Umidade em Eletrodos e Sua Influência nas Trincas a Frio no Metal de Solda" dissertação de mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Brasil, 1989.
- 2 - ALCANTARA, N. G. "Efeito dos Gases na Soldagem de Aços" Capítulo XI do livro "Gases em Metais e ligas" (a ser editado, aceito em 1986), Brasil, 24p.
- 3 - AWS - A 5.1 - 81. "Specification for Covered Carbon Steel Arc Welding Eletrodos" American Welding Society- 1981.
- 4 - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA - EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa do Algodão - C.N.P.A..
- 5 - ALCANTARA, N. G. "Trincas a Frio Causadas pelo Hidrogênio- Problemas e Soluções", In: Simpósio de Tecnologia da Soldagem da Região Sul, 1º - Porto Alegre - RS - Brasil - 22-26 set. 1986, P 31-35, Anais.
- 6 - OKUMURA, T. TANIGUCHI, C. "Engenharia de Soldagem e Aplicações", Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro - Brasil - 1982 - 761p.
- 7 - MELEIRO, J. C. "Soldagem ao Arco com Eletrodo Revestido" - Publicação da ABM - Associação Brasileira de Metais - Coordenação do Eng. EMÍLIO WAINER - 14ª Edição Ampliado - São Paulo - 1979, 145p.
- 8 - MCKEOWN, D. "Hydrogen and Its Control in Weld Metal Construction", 17(10) : 655 - 661 oct. 1985.
- 9 - MACHADO, I. G. "Fluxos e Escórias na Soldagem Elétrica" Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987, 27p.
- 10 - PALMA, J. A., TIMERNAN, R. "Ciência y Técnica de la Soldaduras II", Ediciones Conarco Alambres y Soldaduras S.A. - Buenos Aires - Argentina - 1983, 260p.
- 11 - AWS - A 5.5 - 81 "Specification for Low Alloy Steel Covered Arc - Welding Eletrodos", American Welding Society - 1981, 29p.
- 12 - AWS - A 5.5 - 69 "Specification for Low Alloy Steel Covered Arc - Welding Eletrodos", American Welding Society - 1969.
- 13 - ALCANTARA, N. G. "Weld Metal Cold Cracking " Phd Thesis, Cranfeld, Inglaterra, 1982.

- 14 - LANCASTER, J. F. "Metalurgy of Welding" 3 ed. London, George Allen & Unwin Ltd., 1980, 254p.
- 15 - EASTERLING, K. E. "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding", London, Butterworths & Co. Ltd.
- 16 - GOOCH, T. G. "Metallography Examination of Welds" welding & Metal Fabrication, April - 1990.
- 17 - PERDIGÃO, S. C. "Instrução para Classificação dos Constituintes Microestruturais do Metal de Solda dos Aços Ferríticos, Utilizando Microscopia Ótica". Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, XII, Campos do Jordão, 5-8 out. 1986, p 211 - 228, Anais .
- 18 - IIW Doc. No IX - 1533 - June 1988, "Guide to the Light Microscope Examination of Ferrite Steel Weld Metals".
- 19 - CROVER, A. G. Et al, " The Influence of Cooling Rate and Composition on Microstructure in a C-Mn and HSLA Steel", Welding Journal, 56(9) : 2675 - 2735, 1977.
- 20 - McGRATH, R. S. et al, " Microstructure/Mechanical Property Relationships in Thick- Section C-Mn Narrow-Groove Welds", Welding Journal, 67(9) : 196s - 201s, set. 1988.
- 21 - SAWHILL, J. M., BAKER, J. C. and HOWE, P. "Hydrogen - Assisted Cracking in High-Strength Pipeline Steels" Welding Journal, 65(7) : 175s - 183s, jul. 1986.
- 22 - WINGROVW, A. L. "Weld Bead Morphology and Weldments Cracking" Scand. J. Metalurgy - 1986.
- 23 - ALCANTARA, N. G. and ROGERSON, J. H. " A Prediction Diagram for Preventing Hydrogen-Assisted Cracking in Weld Metal" Welding Journal, 63(4) : 116s - 122s, april 1984.
- 24 - HANSLER, J. H., GRAHAM, J. W., CULLEN, G. V. " Cold Cracking Tests for Determination of Weldability - Assesment of the TEKKEN Test " Australian Welding Resesrch (12), 1970, 1-12p.
- 25 - COE, F. R. "Welding Steels Without Hidrogen Cracking ", The Welding Institute, 1973, 68p.
- 26 - SUZUKI, H. "Revised Cold Cracking Parameter Pha and its Aplications" IIW Doc. IX. 13311-84, jan. 1985, 12p.

- 27 - BS 5135 : 1984 "Guidance on Avoidance of Hydrogen Cracking"
British Standard, Metal of Arc Welding of Carbon -
Manganese Steel, 47p. 1984.
- 28 - Catálogo para Aplicações de Eletrodos da ARCOS- Solda
Elétrica Autógena S/A, ESAB- Elétro Solda Autógena
Industrial S/A, NICROSOL - Indústria e Comércio de Solda
Especiais LTDA.
- 29 - Companhia Siderúrgica Paulista - Cosipa Catálogo LINHA DE
PRODUTOS (PRODUCTS LINE) - São Paulo - Brasil.
- 30 - JOELE, R. "Controle de Umidade no Revestimento de
Eletrodos para Soldagem", (COPPE/UFRJ, M. Sc, Engenharia
Metalúrgica e de Materiais, 1981), 72p.
- 31 - SMITH, D. C., RINEHART, W. G. and JOHANNES, K. P. "Effect of
Moisture in the Coatings of Low-Hydrogen Iron-Powder
Electrodes", Welding Journal, Research supplement, p. 313s -
322s, July 1956.