

CONTROLE DA UMIDADE EM ELETRODOS E SUA INFLUÊNCIA
NAS TRINCAS A FRIO NO METAL DE SOLDA

MANOEL LIMA DA SILVA

CONTROLE DA UMIDADE EM ELETRODOS E SUA INFLUÊNCIA
NAS TRINCAS A FRIO 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: PROJETO DE PRODUTO MECÂNICO

Orientador : Prof. Dr. CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI

Co-orientador : Prof. Dr. NELSON GUEDES DE ALCANTARA

CAMPINA GRANDE
OUTUBRO - 1989

OP-1-18 SED



S586c Silva, Manoel Lima da
Controle da umidade em eletrodos e sua influencia nas
trincas a frio no metal de solda / Manoel Lima da Silva. -
Campina Grande, 1989.
99 f. : il.

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

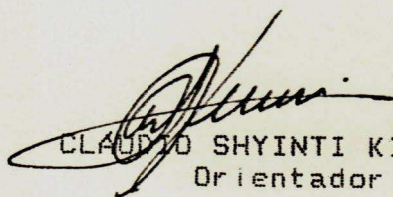
1. Engenharia Mecanica 2. Eletrodos (Mecanica) 3. Metal
de Solda (Mecanica) 4. Dissertacao I. Himinami, Claudio
Shyinti, Dr. II. Alcantara, Nelson Guedes de, Dr. III.
Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) IV.
Titulo

CDU 621(043)

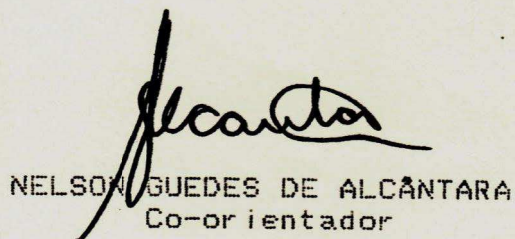
CONTROLE DA UMIDADE EM ELETRODOS E SUA INFLUENCIA
NAS TRINCAS A FRIO NO METAL DE SOLDA

MANOEL LIMA DA SILVA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 24 DE OUTUBRO DE 1989



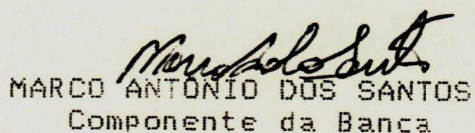
CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI
Orientador



NELSON GUEDES DE ALCANTARA
Co-orientador



TADEU ANTÔNIO DE AZEVEDO MELO
Componente da Banca



MARCO ANTONIO DOS SANTOS
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
OUTUBRO - 1989

DEDICATÓRIA

A
ISABEL, minha esposa
e filhos.

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Dr. CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI, pelo apoio e dedicação como orientador.
- Ao professor Dr. NELSON GUEDES ALCÂNTARA, co-orientador deste trabalho, pela colaboração valiosa (UFSCar - DEMa).
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, que através do projeto nº 400.142/88 possibilitou a execução deste trabalho.
- À Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA) pela gentil doação das chapas para utilização no ensaio TEKKEEN como metal de base.
- À NICROSOL - Ind. e Com. de Soldas Especiais Ltda, ESAB - Eletro Solda Autógena Industrial SA. e ARCOS - Solda Elétrica Autógena SA. pela doação dos eletrodos utilizados nos ensaios.
- Aos professores MANASSES C. A. MELO, MARCO ANTÔNIO DOS SANTOS e THEÓFILO MOURA MACIEL pela solidariedade e atenção sempre que solicitados.
- Ao professor HEBER CARLOS FERREIRA pela permissão e orientação no uso da câmara climatizada e a engenheira SOLANGE MARIA DA R. PATRÍCIO pela colaboração na ajustagem do citado equipamento.
- Ao funcionário FERNANDO JOSÉ DA SILVA e aos bolsistas MÁRIO CESAR ALVES e EGBERTO PEDRO DA SILVA pela cooperação quando da realização dos experimentos.
- Aos colegas JÓGERSON, KÊNIA, LUCIANO, ERINALDO e MARCOS PEDROSO pelo incentivo no decorrer do curso.

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a ₁	- Água quimicamente combinada	(% por peso)
a ₂	- Umidade absorvida	(% por peso)
ASTM	- American Society for Testing Materials	
AWS	- American Welding Society	
b	- Pressão parcial de um gás	(mm de Hg)
°C	- Grau centígrado	
C _b	- Somatório das relações entre a profundidade das trincas e altura do metal de solda	(%)
CE	- Carbono equivalente	
C _f	- Constante de fusão	(g/A.seg)
C _r	- Somatório das relações entre o comprimento das trincas de raiz e o comprimento do metal de solda	(%)
C _s	- Somatório das relações entre o comprimento das trincas de superfície e o comprimento do metal de solda	(%)
CMT	- Coeficiente médio de trincas	(mm ⁻¹)
e	- Espessura	(mm)
E	- Módulo de elasticidade	(Kg f/mm ²)
†	- Eficiência de transferência de calor	
H	- Altura do metal de solda	(mm)
H _c	- Profundidade da trinca	(mm)
H _i	- Aporte de calor	(kJ/mm)

Hd	- Volume de hidrogênio difusível	(ml/100g)
Hmax	- Dureza máxima de Suzuki	
I	- Corrente elétrica em Amperè	(A)
IMT	- Índice médio de trincas	(%)
K	- Grau Kelvin	
L	- Comprimento da solda de teste	(mm)
lc	- Comprimento crítico de referência	(mm)
Lcf	- Comprimento da trinca de superfície	(mm)
Lcr	- Comprimento da trinca de raiz	(mm)
MF	- Metal fundido	
MS	- Metal de solda	
Pcm	- Carbono equivalente de Ito-Bessyo	
Pha	- Parâmetro de trincas de Suzuki	
Po	- Peso do metal depositado	(g)
Pw	- Parâmetro de Ito-Bessyo	
Rf	- Intensidade de vínculo estrutural	(kgf/mm.mm)
TB	-Transformação de fase do metal de base	
Tf	- Tempo de fusão	(seg)
TF	- Transformação de fase	
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 - Constituintes dos fluxos e suas principais funções.....	28
2.2 - Exemplo de composição química dos principais tipos de revestimentos.....	29
2.3 - Exemplos típicos de constantes de fusão.....	30
2.4 - Quantidade máxima de umidade permitida nos revestimentos dos eletrodos básicos de baixo hidrogênio.....	31
3.1 - Composição química percentual do metal de base e de adição.....	66
3.2 - Dados gerais do metal de base e de adição.....	66
4.1 - Dados meteorológicos do município de Campina Grande.....	81
4.2 - Mapa de ensaios (Eletrodo AWS E 7018).....	82
4.3 - Mapa de ensaios (Eletrodo AWS E 11018).....	83
4.4 - Mapa para levantamento do CMT.....	84

RELAÇÃO DE FIGURAS

	PAG.
2.1 - Absorção de umidade nos revestimentos dos eletrodos básicos normais em função do tempo e do percentual de umidade do ar.....	32
2.2 - Quantidade de água (g/m ³) no ar em função da temperatura para vários percentuais de umidade relativa.....	33
2.3 - Conteúdo de umidade em eletrodos AWS E 7018 G, expostos a uma atmosfera com 65% de umidade relativa e temperatura de 294 K (21°C).....	34
2.4 - Redução da umidade por secagem dos eletrodos.....	35
2.5 - Influência do tempo de ressecagem sobre a umidade absorvida.....	36
2.6 - Efeito da temperatura de ressecagem sobre a umidade absorvida.....	36
2.7 - Posições e orientações comuns das trincas a frio causadas pelo hidrogênio.....	37
2.8 - Corte longitudinal de um cordão de solda a arco com eletrodo revestido, ilustrando o mecanismo de migração do hidrogênio à ZTA.....	38
2.9(a)- Dissolução do hidrogênio em aço. (b)- Coeficiente de difusão do hidrogênio.....	38
2.10 - Fissuração a frio no cordão.....	39
2.11 - Diagrama esquemático CCT mostrando o efeito de três taxas de resfriamentos distintos sobre a microestrutura.....	39
2.12 - Hidrogênio difusível no metal de solda da atmosfera do arco elétrico.....	40

2.13 -	Variação da velocidade de difusão do hidrogênio no aço, com a temperatura.....	41
2.14 -	Efeito da água absorvida no hidrogênio difusível.....	42
2.15 -	Efeito da água combinada no hidrogênio difusível.....	43
2.16 -	Efeito da pressão parcial no hidrogênio difusível.....	44
2.17 -	Corpo de prova para avaliação de trincas a frio através de ensaio de alto restrição LEHIGH.....	45
2.18 -	Ensaio de severidade térmica controlada....	46
2.19 -	Corpo de prova para ensaio de avaliação de trincas a frio de restrição externa. Ensaio de RESTRIÇÃO RIGIDA.....	47
2.20 -	Corpo de prova para avaliação de trincas a frio através de ensaio de restrição externa. Ensaio de RESTRIÇÃO TENSIONADA.....	47
2.21 -	Corpo de prova para ensaio de IMPLANTE.....	48
2.22 -	Corpo de prova para ensaio de avaliação de trincas a frio, de alto restrição TEKKEN.....	49
2.23 -	Índice de trincas no metal de solda.....	50
2.24 -	Seleção das seções do cordão de solda para análise.....	51
2.25 -	Corte para isolamento da parte central do corpo de prova.....	52
2.26 -	Mapa com percentuais estimados do índice de trincas.....	52
2.27 -	Diagrama de eficiência térmica para tempo de resfriamento entre 1.073 e 773 K (800 a 500°C) em função das condições de soldagem.....	53

2.28 -	Curva típica de dureza para aços C-Mn.....	54
2.29 -	Diagramas para previsão de formação de trincas a frio, considerando energia de soldagem e teor de hidrogênio difusível....	54
3.1 -	Cochicho de PVC com sílica-gel para proteção dos eletrodos contra umidade.....	67
3.2 -	Cochicho de PVC com isolamento térmico.....	68
3.3 -	Câmara climatizada POWER-D-MATIC 60.....	69
3.4 -	Dispositivo para preparação de chanfro em duplo V para aplicação de solda de restrição.....	70
3.5 -	Gabarito para nivelamento do corpo de prova durante a aplicação da solda de restrição.....	71
3.6a -	Equipamento para solda a arco-elétrico. Esquema para cálculo da corrente, tensão e tempo de soldagem.....	72
3.6b -	Exemplo de cálculo de amperagem e tempo de soldagem, utilizando-se aparelho Registrador Gráfico Potenciométrico.....	73
3.7 -	Exemplo de medição de área pelo método planimétrico ou de Jeffreis.....	74
4.1 -	Gráfico da umidade absorvida por exposição ao ar livre.....	85
4.2 -	Efeito da temperatura sobre a umidade absorvida (eletrodo AWS E 7018).....	86
4.3 -	Efeito da temperatura sobre a umidade absorvida (eletrodo AWS E 11018).....	87
4.4 -	Efeito da umidade relativa sobre a umidade absorvida (eletrodo AWS E 7018)....	88
4.5 -	Efeito da umidade relativa sobre a umidade absorvida (eletrodo AWS E 11018)...	89
4.6 -	Ensaio TEKKEK - Verificação de trincas (eletrodo AWS E 7018).....	90

4.7	-	Ensaio TEKKEN - Verificação de trinças (eletrodo AWS E 11018).....	91
4.8	-	Seção transversal do metal de solda com trinca a frio causada por hidrogênio.....	92
4.9	-	Microestrutura do metal de solda da amostra B 5.....	93
4.10	-	Microestrutura do metal de solda da amostra B 9.....	93

Neste trabalho, a variação do teor de umidade nos revestimentos dos eletrodos básicos baixo hidrogênio, AWS E 7018 e E 11018, foram avaliados 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. Demonstram também que níveis acima dos limites permitidos pelas normas são atingidos em poucas horas de exposição à condições normais do ambiente. Para avaliação da influência da umidade assim adquirida, no aparecimento de trincas a frio no cordão de solda causadas por hidrogênio, ensaios TEKKEN, com chanfro em Y simétrico, foram realizados com chapas de aço ASTM - A 516 - gr 65. Com o teor de umidade absorvida, após ressecagem, variando de 0% até 2,7%, corpos de prova foram ensaiados com os dois tipos de eletrodos onde o aporte de calor foi variado de 1,55 kJ/mm à 2,60 kJ/mm. Não se verificou aparecimento de trincas quando se usou os eletrodos AWS E 7018. Quando se usou os do tipo AWS E 11018, as trincas surgiram quando condições críticas de umidade absorvida e aporte de calor foram utilizadas; sendo que um nível mínimo de energia de 2,0 kJ/mm foi necessário para se evitar trincas mesmo com aqueles eletrodos ressecados.

In this work, the variation of absorption level in AWS E 7018 and E 11018 covered electrodes was evaluated during storage at room and controlled temperature, and at different moisture absorption condition. The results showed the sensibility of the moisture absorption rate with the variation of temperature and/or air moisture. The maximum moisture levels recommended are reached after few hours at room temperature. The influence of this moisture absorption on weld metal hydrogen induced cracking of ASTM - A 516 - gr 65 steel plates was studied by using a symmetrical Y - groove Tekken test. Welding were carried out with 0% to 2,7% of absorptioned moisture level after readrying and 1,55 kJ/mm to 2,60 kJ/mm of heat input. No cracking was observed with E 7018 electrodes. For critical conditions of moisture level and heat input, cracking were observed with E 11018 electrodes, where a minimum heat input of 2,0 kJ/mm was necessary to avoid cold cracking.

Capítulo - 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

- 1.1 - Introdução. 1
- 1.2 - Objetivos. 3

Capítulo - 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 - Considerações Iniciais. 4
- 2.2 - Umidade nos Revestimentos dos Eletrodos Básicos. 5
 - 2.2.1 - Os Revestimentos e suas Funções. 5
 - 2.2.2 - Revestimentos dos Eletrodos Básicos. 7
 - 2.2.3 - Influência da Temperatura e Umidade Relativa. 9
 - 2.2.4 - Umidade Absorvida e Umidade Combinada. 11
 - 2.2.5 - Ressecagem. 12
- 2.3 - Trincas a Frio Causadas pelo Hidrogênio. 13
 - 2.3.1 - Fatores que Influenciam. 14
 - 2.3.2 - Hidrogênio Difusível. 16

2.3.3 - Relação Umidade versus Hidrogênio.	18
2.3.4 - Ensaio de Soldabilidade.	19
2.3.5 - Ensaio TEKKEN.	21
2.3.6 - Métodos de Prevenção	23
Tabelas e figuras do capítulo 2	27

Capítulo - 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Absorção de Umidade.	55
3.1.1 - Materiais e Equipamentos.	55
3.1.2 - Métodos.	56
3.2 - Trincas a Frio por Hidrogênio.	60
3.2.1 - Materiais e Equipamentos.	60
3.2.2 - Métodos.	62
3.3 - Análise Metalográfica.	64
3.3.1 - Materiais e Equipamentos.	64
3.3.2 - Métodos.	64
Tabelas e figuras do capítulo 3	65

Capítulo - 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Absorção de Umidade.	75
4.2 - Trincas a Frio por Hidrogênio.	77
4.3 - Exame Metalográfico.	78
Tabelas e figuras do capítulo 4	80

Capítulo - 5 - CONCLUSÕES 94

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	96
----------------------------------	----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
----------------------------	----

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 - Introdução

A soldagem tem hoje um vasto campo de aplicações. Nas atividades industriais, é um fato incontestável sua utilização em larga escala, tanto na área de produção quanto na de manutenção.

O prolongamento da vida útil de uma peça soldada é importante, porque garante o bom desempenho dos manufaturados, sobretudo daqueles onde a segurança é fator fundamental, como por exemplo, os provenientes da indústria automobilística, naval, aeronáutica, da construção civil e muitas outras.

Estima-se que anualmente são gastos alguns bilhões de dólares pelas indústrias mundiais para resolver problemas de soldagem de manufaturados, e que pelo menos 20% destes problemas são devidos às trincas a frio causadas pelo hidrogênio /1/.

A trinca a frio, razão maior deste trabalho, é um defeito causado pela presença de hidrogênio nas juntas soldadas associado à tensões residuais, microestrutura susceptível e baixas temperaturas de soldagem. O hidrogênio, originário sobretudo do excesso de umidade nos revestimentos dos eletrodos, é absorvido pela poça de fusão durante o processo de soldagem. Ali permanecendo, ou migrando para outras regiões da junta soldada, torna-se um dos principais causadores da sua má qualidade, podendo até ocasionar falhas prematuras e catastróficas das estruturas soldadas. A trinca a frio ocorre quase sempre algum tempo após a soldagem. Geralmente é evitada com um tratamento térmico de pré ou pós soldagem, ressecagem dos eletrodos ou fluxos e/ou controlando-se a taxa de resfriamento durante a solidificação do metal de solda /2/.

Vários ensaios de soldabilidade foram desenvolvidos para avaliar a trinca a frio e a ação dos fatores influentes na sua formação. O ensaio TEKKEK é um dos principais e mais usados por ser de fácil execução e baixo custo. Também foram desenvolvidos gráficos, fórmulas e tabelas, com finalidade de fornecer dados para prevenir defeitos nas juntas soldadas. Entretanto, é pouco provável que deixe de haver limitações para

as técnicas de avaliação e precaução destes defeitos, isto devido a grande variedade de parâmetros envolvidos nos processos de soldagem e a vasta variedade de aços ora fabricados.

No presente trabalho procurou-se ao máximo, adaptar as condições de ensaio principalmente àquelas verificadas no processo de absorção de umidade pelos eletrodos, às condições de umidade relativa e temperatura reinantes na região polarizada por Campina Grande. Com isto procurou-se avaliar até que ponto estas condições afetariam a integridade das estruturas soldadas, sobretudo nas pequenas empresas do ramo, onde as condições de manutenção e manipulação dos consumíveis são precárias.

1.2 - Objetivos

- Avaliação da variação do teor de umidade nos revestimentos dos eletrodos básicos, AWS E 7018 e E 11018, quando expostos às condições ambientais e condições controladas de temperatura e umidade relativa.
- Avaliação da influência do teor de umidade nos revestimentos dos eletrodos AWS E 7018 e E 11018 quanto ao aparecimento de trincas a frio no cordão de solda através de ensaios de auto restrição TEKKEN em chapas de aço ASTM - A 516 gr 65 com variação do aporte de calor.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Considerações Iniciais.

Ao realizar-se uma solda a arco elétrico, principalmente sob fluxo ou 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. O hidrogênio, altamente solúvel no aço em estado líquido, pode ser parcialmente eliminado durante o resfriamento. Quanto mais rápido for o resfriamento da junta soldada menor tempo o hidrogênio, em forma de gás, terá para sua liberação. Permanecendo retido, exercerá ação danosa, sobretudo formando pressões internas causadoras de trincas.

Pode-se encontrar hidrogênio nas seguintes situações /3/.

- umidade do ar absorvida pelos fluxos e revestimentos;
- vapor d'água oriundo da combustão de materiais orgânicos contidos em tintas, óleos, graxas, etc.;
- películas de óxido dos arames de adição ou do próprio metal de base;
- na composição do próprio aço, como solução sólida de hidrogênio monoatômico ou como inclusões na forma molecular;
- na água de cristalização dos constituintes do revestimento.

Todos os fatores acima são importantes, porém um se destaca por existir abundantemente na atmosfera e pela facilidade com que penetra nos revestimentos dos eletrodos. É a umidade do ar, que será destaque no próximo item.

2.2 - Umidade nos Revestimentos dos Eletrodos Básicos.

2.2.1 - Os Revestimentos e suas Funções.

Os eletrodos podem ser avaliados pela qualidade do metal de solda, maior rendimento e facilidade com que poderão ser utilizados pelos soldadores. Estas características são sensivelmente influenciadas pelos revestimentos, na sua estreita ligação com aspectos de soldabilidade, defeitos e facilidade operacional. Suas principais funções são /4/.

- proteger o arco contra o oxigênio, nitrogênio e hidrogênio (da umidade) do ar;
- reduzir a velocidade de solidificação, permitindo a desgaseificação do metal de solda, através da escória;
- facilitar a abertura e estabilização do arco;
- introduzir elementos de liga no depósito e desoxidar o metal de solda;
- facilitar a soldagem nas diversas posições de trabalho;
- servir de guia às gotas em fusão, na direção do banho.

A maioria dos fluxos para soldagem dos aços são fabricados com minerais. Para satisfazer os requisitos de uma boa soldagem, a prática demonstrou existir certos compostos que, quando adequadamente reunidos, apresentam as propriedades desejáveis. A tabela 2.1 relaciona alguns compostos que em menor ou maior escala participam da formulação dos fluxos utilizados nos diferentes processos de soldagem. Esta tabela pode ser analisada considerando-se os compostos aglutinados em sete categorias /5/.

1ª Categoria: inclui os minerais utilizados para proteger a solda da atmosfera. São os formadores de gás, como por exemplo, os carbonatos de cálcio, manganês e potássio que ao se decompor com o calor fornecem uma proteção de CO_2 . Estão também nesta categoria

os formadores de escória, que protegem a solda após o arco ter passado. A escória flutua sobre o metal fundido constituindo-se num isolante térmico evitando uma maior taxa de resfriamento. Também ajuda na desgaseificação do metal de solda prevenindo a formação de porosidades.

- 2ª Categoria: nela, estão os minerais que reduzem as impurezas das soldas, como carbonato de cálcio e manganês; óxido de cálcio; etc.
- 3ª Categoria: encontram-se nesta categoria, aqueles compostos que agem para iniciar e estabilizar o arco, incluindo-se as adições metálicas, tais como níquel e pó de ferro.
- 4ª Categoria: nesta estão os agentes desoxidantes ou redutores como as ligas de ferro (FeSi; FeMn; etc.) e pó de ferro.
- 5ª Categoria: contém minerais para controlar as propriedades físicas de um fluxo, as quais, determinam a facilidade de remoção da escória, intervalo de fusão e solidificação, fluidez do metal líquido etc.
- 6ª Categoria: encontram-se os responsáveis pelo aumento da taxa de deposição e elementos de liga, tais como as ligas de ferro e pós de níquel e ferro.
- 7ª Categoria: nesta última estão os aglutinantes e minerais utilizados para aumentar a resistência mecânica dos revestimentos incluindo os silicatos de sódio e potássio; mica e outros aglutinantes orgânicos.

O revestimento é geralmente estrudado em um arame ("alma"), sendo necessário que possua certas características para que possam ser alcançadas altas velocidades na fabricação.

A "alma" é na maioria dos casos, para eletrodos de aço ao carbono e baixa liga, constituída por um aço efervescente de baixo carbono.

Apesar das subdivisões previstas pelas normas, existem quatro tipos fundamentais de revestimento /5/:

Ácido: contém grande quantidade de minérios de ferro, manganês e silicatos (de alumínio). Desta forma o metal de solda é de aço efervescente, devido aos altos índices de oxigênio e hidrogênio e são altamente susceptíveis as trincas de solidificação. Elementos

tais como carbono, enxofre e fósforo devem ser mantidos em baixos níveis.

Celulósico: caracteriza-se pela grande produção de gases resultantes da combustão de materiais orgânicos, sendo típica a proporção de 1,0% CO_2 ; 55,0% CO ; 42,0% H_2 e 1,5% H_2O e adicionando-se silicato de zircônio como auxiliar na estabilidade do arco e para destacar a escória /5/. Apesar de depositar solda com relativamente alta qualidade e tenacidade, não são indicados para soldagem de aços de muito alta resistência mecânica, pois seriam necessários valores de pré-aquecimento excessivos, de modo a eliminar o hidrogênio e prevenir trincas. É importante ressaltar que os eletrodos deste tipo, não aceitam secagem a temperaturas muito altas, sob pena do revestimento decompor-se.

Rutílico: nestes eletrodos, os minerais de mangânes e ferro dos do tipo ácido foram substituídos por TiO_2 . Deste modo, a tendência de obter-se metal de solda efervescente é reduzida. Utilizando-se até 15% de celulose, produz uma atmosfera redutora com características similares ao celulósico. Devido a facilidade de operação, estes eletrodos são considerados de uso geral.

Básico: será estudado em 2.2.2

A tabela 2.2 apresenta composições típicas para os quatro tipos de revestimentos acima apresentados, devendo ser encarada, tão somente, como um guia aproximado.

2.2.2 - Revestimento dos Eletrodos Básicos.

Os eletrodos com revestimentos básicos apresentam melhores características mecânicas, notadamente resiliência. Daí sua utilização em trabalhos que exigem alta segurança (turbinas, vasos de pressão, obras de arte, etc.), ou na soldagem de aços considerados de baixa soldabilidade. Por apresentar baixo teor de hidrogênio, conseqüentemente boa resistência a defeitos causados por este elemento, são preferidos ao se soldar aços com tendência a apresentar um endurecimento muito grande na zona de transformação. São recomendados para trabalhar com aços cujo teor de carbono seja superior a 0,2% ou que contenha mais de 0,05% de fósforo ou enxofre. Também, quando se tratar de peças com grande espessura, com tendência a uma maior taxa de resfriamento, nas quais as tensões de contração possam provocar ou influenciar na formação de trincas /4/.

Um dos componentes mais importantes nos revestimentos dos eletrodos básicos é o pó de ferro. Os eletrodos que incluem em seus revestimentos este componente, são conhecidos como de alto rendimento. Enquanto os demais apresentam rendimento em relação a alma de 80 a 98%, os eletrodos com pó de ferro, dependendo da quantidade deste componente, podem chegar a 230%. O aumento de percentual é obtido com a contribuição do pó de ferro e elementos de liga, caso estes estejam também presentes no revestimento. O rendimento em relação a alma de um eletrodo é a relação entre o peso do metal depositado e o peso da alma no comprimento correspondente a parte fundida. Os eletrodos básicos com pó de ferro apresentam importantes características /4/:

- devido a formação de uma cratera profunda, permitem soldagens com revestimento apoiado no metal de base, por isto, sendo também chamados eletrodos de encosto;
- a posição de soldagem deve ser quase perpendicular à junta com ângulo entre 80 e 90°;
- o revestimento é mais condutor, permitindo maior velocidade de soldagem, com maior amperagem;
- ativa mais facilmente o arco, com simples atrito;
- recomenda-se trabalhar com arco curto, da ordem de metade do seu diâmetro, para reduzir perdas por salpico, prevenir formação de poros e melhorar o aspecto do cordão;
- por ser mais condutor permite manter, mesmo com arco relativamente longo, boa estabilidade.
- apresenta fácil remoção de escória, pouco risco de formação de inclusões e média penetração;
- o custo de mão de obra mais matéria prima é mais baixo por Kg de metal depositado;
- melhora o fator de potência do aparelho, por trabalhar com tensões de arco mais elevadas.

Os eletrodos básicos contém também em seus revestimentos quantidades importantes de óxido de cálcio, carbonato de cálcio, carbonatos básicos e fluorita. Assim, o caráter de sua escória, do ponto de vista metalúrgico, é básico, e quanto maior esta basicidade, menor a susceptibilidade às trincas de solidificação. Uma outra característica é a diminuição de sua constante de fusão pelo aumento no percentual do carbonato de cálcio, passando por um mínimo numa concentração de 35% do citado composto. Constante de fusão de um eletrodo é o peso do metal depositado por unidade de tempo e corrente elétrica/4/.

$$C_f = \frac{P_o}{I \cdot t_f}$$

onde: C_f - constante de fusão
 P_o - peso do metal depositado (g)
 I - corrente elétrica (A)
 t_f - tempo de fusão (s)

A constante de fusão varia muito pouco com a tensão do arco, e cresce ligeiramente com o diâmetro do eletrodo. Na tabela 2.3 mostra-se algumas constantes de fusão para valores de diâmetros de alguns eletrodos básicos /4/.

2.2.3 - Influência da Temperatura e Umidade Relativa.

Os eletrodos básicos oferecem bons resultados em soldagens, porém seus revestimentos são fortemente higroscópicos. A figura 2.1 apresenta um exemplo de absorção de umidade com eletrodos básicos, em função do tempo de exposição, para alguns percentuais de umidade relativa. Note-se que os revestimentos absorvem grande quantidade de água, sobretudo quando o valor da umidade relativa ultrapassa níveis de 70% e que a fração de água absorvida é proporcional ao tempo de exposição. Portanto, quanto maior o tempo de estocagem dos eletrodos em presença de umidade, maior a quantidade de água retida em seus revestimentos.

Estes são os fatores que afetam a absorção de umidade /6/.

- composição química dos revestimentos;
- granulometria dos constituintes dos revestimentos;

- espessura dos revestimentos;
- grau de empacotamento dos constituintes;
- quantidade de umidade inicialmente presente nos revestimentos;
- temperatura;
- umidade relativa.

Os cinco primeiros fatores são inerentes às características e controle dos fabricantes, enquanto os dois últimos, dentro de certos limites, poderão ser controlados pelos próprios usuários.

A umidade pode comprometer os eletrodos revestidos, principalmente os de baixo hidrogênio, se não houver um controle efetivo das condições do ambiente onde eles possam permanecer. A umidade relativa influencia na umidificação dos eletrodos, porque quanto maior o seu valor maior a quantidade de água em suspensão no ar. Quanto a temperatura, sua influência se verifica porque, dentro de certos limites, aumentando-se seu valor intensifica-se a evaporação de água, e conseqüentemente será maior a quantidade de vapor em suspensão no ambiente. Portanto aumentando-se a temperatura de um determinado recinto, torna-se necessário maior quantidade de água em suspensão, desde que se deseje manter a umidade constante. Assim, para um mesmo valor de umidade relativa, os dias quentes são mais perigosos, para fins de absorção de umidade. A figura 2.2 mostra a quantidade de água contida no ar, em função da temperatura, para vários percentuais de umidade relativa /7/.

Para se analisar o nível de umidade de um eletrodo vários métodos são utilizados, porém, o mais difundido é o normalizado pela AWS (American Welding Society) A5.5-81 /8/, para determinação de umidade absoluta. Esta mesma norma estabelece critérios para dosagem de valores máximos de umidade nos revestimentos dos consumíveis conforme sua classe e seu tipo. Estes requisitos são mostrados na tabela 2.4. Os diferentes percentuais de umidade máxima admissíveis para diferentes tipos de eletrodos, se devem ao fato de que são classificados com base, entre outros fatores, na composição química e propriedades mecânicas do metal depositado, originando diferentes tipos de microestruturas. Aqueles que formam microestruturas mais vulneráveis às trincas têm seus níveis de umidade máxima admissível controlados com maior rigor, ou seja, com menor percentual de umidade.

2.2.4 - Umidade Absorvida e Umidade Combinada.

Uma das características mais importantes dos revestimentos dos eletrodos é sua capacidade de absorver umidade. Esta umidade pode se apresentar nas formas: Adsorvida, higroscópica e combinada /5//9/. Adsorvida é água de condensação na superfície do eletrodo e que não houve tempo suficiente para difundir-se no revestimento. Higroscópica é água absorvida da atmosfera pelo revestimento através de vazios internos, onde penetra por capilaridade. Esta água, por estar mecanicamente infiltrada no revestimento, é facilmente eliminada por evaporação quando aquecida a temperaturas relativamente baixas.

A higroscópicidade dos eletrodos básicos deve-se a utilização em seus revestimentos de componentes que favorecem a absorção, principalmente aqueles utilizados como agregantes, como é o caso dos silicatos de sódio e potássio. Minerais como o CaO, utilizado como dessulfurizante e MgO, por exemplo, são também altamente higroscópicos/5/. As diferentes proporções destes componentes que são adicionados nos revestimentos fazem com que, eletrodos pertencentes a uma mesma classe, mas fabricados por diferentes produtores, absorvam umidade à taxas variadas dependendo dos fatores tempo/temperatura a que são submetidos. A figura 2.3 exemplifica este fato. Ilustra-se nesta figura o comportamento da umidade nos revestimentos de eletrodos AWS 7018 G, produzidos por seis diferentes fabricantes, quando os mesmo são expostos a tempos variados numa temperatura de 294 K (21°C) e umidade relativa de 65%. Pesquisas realizadas por Hirai e colaboradores /10/, demonstram que o uso do silicato de lítio reduz a higroscopicidade nos revestimentos dos eletrodos.

No terceiro tipo de umidade, a água se apresenta combinada aos componentes do revestimento, em duas variedades: como água de cristalização e como água de constituição /9/. A água de cristalização é aquela quimicamente combinada com as substâncias utilizadas como agregantes, como é o caso dos silicatos de sódio, potássio ou lítio. A fração de água absorvida que se transforma em água cristalizada aumenta com o tempo. Assim, quanto maior o tempo do eletrodo em presença de umidade, maior a quantidade de água absorvida que se transforma em água quimicamente combinada. É importante ressaltar que para eliminação desta água, precisa-se de temperaturas acima de seu ponto de ebulição, como mostra a figura 2.4. O gráfico desta figura foi traçado, usando-se como corpos de prova eletrodos estocados durante três meses a uma umidade de 85%. /4//11/. É importante saber que a temperatura e o tempo de secagem podem ser função das condições sob as quais os eletrodos absorveram a umidade.

A água de constituição é inerente a estrutura cristalina do mineral dos componentes que entram na formação dos revestimentos como: asbestos, talco, argila, etc., normalmente utilizados para facilitar os processos de extrusão.

A forma mais simples de água combinada é a de cristalização, mantida pelos silicatos após cozimento, sendo sua quantidade variável com o tempo e temperatura deste cozimento /11/.

2.2.5 - Ressecagem.

A maioria dos eletrodos permitem a absorção de uma quantidade significativa de umidade sem que se verifique uma mudança marcante em suas características operativas ou na qualidade de suas soldas. Porém neste estado, os eletrodos de baixo hidrogênio rapidamente perdem suas condições ideais de trabalho. A norma AWS A5.5 - 81 /8/, por exemplo, permite a utilização de eletrodos na condição como recebido, exceto os de baixo hidrogênio. A umidade no revestimento aumenta a quantidade de hidrogênio no MS e na ZTA devido a dissociação da água no arco elétrico, que o transfere a poça de fusão, aumentando a possibilidade de defeitos. Por este motivo, 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 em 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 exercem substancial influência nos eletrodos básicos quanto a velocidade de absorção de umidade após a ressecagem. A figura 2.5 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. A figura 2.6 mostra, também em eletrodos E 7018, o efeito da temperatura de ressecagem. A temperatura sendo maior, a velocidade de absorção, após ressecagem, será menor. Isto também é válido quando o tempo de permanência de ressecagem embora menor, a temperatura seja mais elevada /12/.

Existem, porém, outras condições que limitam o tempo e a máxima temperatura de ressecagem. Os eletrodos celulósicos, por exemplo, não aceitam temperaturas superiores a 393K (120°C) sob risco de uma combustão precoce dos

constituintes orgânicos e conseqüente deteriorização dos revestimentos. Enquanto isto os eletrodos básicos admitem ressecagem em temperaturas de até 673K (400°C), permitindo uma redução drástica do conteúdo de umidade dos revestimentos sem prejuízo de suas propriedades. Uma temperatura acima dos 673K (400°C) poderia provocar oxidação de componentes dos revestimentos notadamente o Fe Si, Fe Mn e pó de ferro, com decorrentes modificações na análise do metal depositado. Um outro fator que certamente provocaria oxidação dos revestimentos seria o tempo de ressecagem prolongado, acima das duas horas recomendadas pela AWS. Não seria recomendável também que eletrodos ressecados voltassem a absorver umidade pois dificilmente seus revestimentos aceitariam uma nova ressecagem, sem danos a 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, lá existentes. Desta forma deverão ser colocados em estufas:

- eletrodos provenientes de embalagens recém abertas;
- eletrodos provenientes de fornos de ressecagem.

2.3 - Trincas a Frio Causadas pelo Hidrogênio.

As trincas a frio causadas por hidrogênio podem ocorrer no metal de solda ou na zona afetada termicamente. Seu comprimento pode ter desde alguns microns até centímetros. Sua orientação em relação a junta soldada pode ser transversal ou longitudinal e quanto a posição pode estar na raiz da solda, no centro ou superfície da junta. Estas trincas são mostradas esquematicamente na figura 2.7.

No aspecto microscópico, as trincas a frio são preferencialmente transgranulares. É o caso de depósitos em aços doce ao carbono e aços carbono - mangânes. Entretanto estas trincas podem ocorrer nos contornos de grãos de ferrita próeutetóide, como no caso de solda em aços baixa liga e ao cromo - molibdênio. Em casos especiais, porém, as trincas a frio podem ser mistas, ou seja, quando acontecem de modo transgranular e intergranular simultaneamente /1/.

As trincas a frio são também chamadas trincas de espera porque nem sempre ocorrem logo após a soldagem, quando a temperatura ambiente é atingida, mais sim, demoram algum tempo até que aconteçam, e sejam detectadas.

2.3.1 - Fatores que Influenciam.

Existe um consenso de que são quatro os principais fatores que influenciam na formação das trincas a frio causadas pelo hidrogênio: Teor de hidrogênio, microestrutura susceptível, temperatura e nível de tensões /1/.

Teor de hidrogênio - O papel que o hidrogênio desempenha é conhecido há anos e está na origem do desenvolvimento dos eletrodos básicos. Sua presença, mesmo a baixos níveis, é observada em todos os aços, tanto na forma atômica, em solução sólida, quanto na forma molecular em inclusões e cavidades. Também pode ser encontrado na superfície dos aços com os compostos orgânicos, ferrugem, tintas, óleos e graxas.

A introdução do hidrogênio na junta soldada pode acontecer por diversas fontes, tornando-se imprescindível quantificar o seu teor, tendo em vista que, na maioria dos casos, não pode ser tolerado. Como o hidrogênio, no caso de soldagem a arco com eletrodo revestido, é devido principalmente à umidade contida neste revestimento, pode-se considerar a medição do teor de umidade como o hidrogênio disponível no processo. Esta consideração apenas apresenta o inconveniente de que nem toda a umidade medida é absorvida na forma de hidrogênio pela poça metálica em solidificação /2/.

A figura 2.8 ilustra esquematicamente, em corte longitudinal do metal de solda produzido por soldagem a arco com eletrodo revestido, o mecanismo de difusão dos ions de hidrogênio num certo instante /3/. No metal de solda, portanto, ao ser atingida a temperatura de transformação de fase TF (mudando a estrutura para ferrita, perlita ou bainita) ocorre uma brusca descontinuidade da solubilidade do hidrogênio, como ilustra a figura 2.9 (a), resultando numa migração forçada dos ions em direção a ZTA, a qual se mantém ainda com estrutura austenítica, e cujo resfriamento é retardado em relação ao MS. Assim entre os pontos A e B da figura 2.8, ions de hidrogênio difundem através dessa zona de ligação para a ZTA, em cuja estrutura, esses ions tem baixo coeficiente de difusão, como ilustra a figura 2.9 (b). Isto ocasiona uma concentração de ions de hidrogênio nesta região que, se transformada em uma estrutura frágil, cria uma condição favorável para formação de trincas a frio. Quanto maior for o teor de carbono no metal de base, mais baixa será a temperatura de transformação de TB e maior a "janela" AB através da qual ocorrerá a difusão, sendo também maior a possibilidade de fissuração. Os aços auto-temperáveis, de dureza elevada, podem trincar a frio mesmo com baixos teores de hidrogênio.

Caso a microestrutura do metal de solda tenha maior temperabilidade que o metal de base, a ordem das isotermas de transformação se inverte. O cordão de solda se transformará por último, sofrendo, por esta razão, o efeito de restrição da ZTA subjacente já transformada, como ilustra a figura 2.10. Assim a fissuração se dará no MS quase sempre no sentido longitudinal /13/.

Microestrutura susceptível - As microestruturas tanto da ZTA como do MS são decisivas com relação às trincas a frio causadas pelo hidrogênio. É o caso das microestruturas martensíticas que por serem mais susceptíveis devem, sempre que possível, serem evitadas.

Na zona termicamente afetada, onde o metal atinge as maiores temperaturas sem fundir, acontecem as maiores velocidades de resfriamento. Verifica-se nesta região, o aumento do tamanho do grão e o aparecimento de uma estrutura endurecida e frágil, sendo local de grande risco de fissuração. De fato, a têmpera ocorre se a velocidade de resfriamento for grande, isto é, notadamente maior que a velocidade crítica de têmpera do aço, que é função de sua espessura e geometria, energia de soldagem, temperatura de pré-aquecimento, se existir, e propriedades físicas dos materiais. Entretanto o ciclo térmico de soldagem, juntamente com a composição química do material, são os fatores mais significativos na determinação da microestrutura e propriedades da junta soldada /14/. A figura 2.11 mostra o efeito de três taxas de resfriamento distintos sobre a microestrutura, em diagrama CCT, para um aço baixo carbono.

Inumeros trabalhos foram desenvolvidos para identificação e definição da terminologia das microestruturas do MS, sendo aqui priorizado o de ALCÂNTARA /2/.

Os principais componentes microestruturais identificados neste trabalho e que têm influência na trinca a frio causada por hidrogênio são: A FERRITA PROEUTETÓIDE que se enquadra na categoria de Ferrita Primária. De modo geral não desejável quando se quer evitar a trinca a frio principalmente por possuir grãos grosseiros. FERRITA COM PLACAS LATERAIS, inclui-se na categoria de Ferrita com M-A-C (martensita-austenita-carbeto) Alinhados. Seu efeito, normalmente, só é prejudicial a resistência à clivagem. A FERRITA ACICULAR é o constituinte microestrutural mais desejável para se evitar trincas a frio causadas pelo hidrogênio, por apresentar pequeno tamanho de grão e boa combinação de resistência e tenacidade. A PERLITA que se enquadra na categoria de Agregado Carbeto-Ferrita, normalmente por aparecer em pequenas quantidades, não influi decisivamente na trinca a frio. Já os constituintes BAINÍTICOS, Bainita Superior e Bainita Inferior, podem ser enquadrados na categoria de Ferrita com M-A-C não Alinhados, e

geralmente são indesejáveis quando se quer evitar a trinca a frio. Finalmente a MARTENSITA que é a microestrutura mais susceptível à esse tipo de trinca.

Temperatura - Nos aços ferríticos a fragilização por hidrogênio ocorre entre 173 e 473 K (-100 e +200°C) sendo que seu ponto de máximo efeito ocorre a temperatura ambiente. Este fato indica que, independente da microestrutura e do teor de hidrogênio, quanto maior a temperatura menor a possibilidade de surgimento da trinca a frio /1/. A influência da temperatura se relaciona com a alteração da taxa de suprimento de hidrogênio aos pontos de nucleação das trincas, controladas por difusão e/ou pelo transporte de hidrogênio por discordâncias. Uma maior energia de soldagem reduz a taxa de resfriamento, reduzindo a possibilidade de trincas a frio. Um tratamento térmico pré ou pós soldagem também reduz esta possibilidade.

Nível de tensões - As trincas a frio causadas pelo hidrogênio podem ser influenciadas tanto por efeitos metalúrgicos quanto mecânicos. Dessa forma, o mecanismo de formação destas trincas pode ser avaliado sob o aspecto mecânico, já que as trincas iniciam quando a tensão e deformação atingem valores críticos de tolerância.

Quando um cordão de solda é depositado entre duas placas, o calor que é transferido causa alguma expansão. Conforme a poça metálica vai-se resfriando, ocorre a solidificação, e o metal de solda desenvolve significativa força de contração que ancoram as placas sobre si. Desta forma como a maioria das juntas soldadas fazem parte de uma estrutura rígida, a contração sofrida pelo cordão de solda em solidificação, produz níveis de tensão que pode atingir valores críticos de tolerância de tal forma a trincar. Esta força pode ser expressa em termos de Intensidade de Restrição (Rf) que é força desenvolvida por unidade de comprimento por unidade de solda contraída, ou seja Kg/mm.mm. Uma alternativa para se evitar o problema, se possível, seria não deixar ancorados os metais de base a serem soldados /1//2/.

2.3.2 - Hidrogênio Difusível.

Dos fatores que afetam a absorção e difusão de gases nas juntas soldadas cita-se os seguintes /15/:

- a composição efetiva da atmosfera de proteção do arco elétrico;

- a temperatura e reação entre a poça de fusão e os gases circunvizinhos.
- a solubilidade do gás no metal à várias temperaturas;
- a difusão do gás no metal fundido.
- o comportamento do gás na poça de fusão durante a solidificação e resfriamento.

Durante uma operação de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, ao dissociar-se na atmosfera deste arco, a umidade do revestimento forma ions de hidrogênio que podem ser absorvidos em grande quantidade pelo metal de solda conforme mostra a figura 2.12 /16/. Este hidrogênio contido na junta soldada é a soma de duas frações distintas, o hidrogênio difusível (aquele que à temperatura ambiente se difunde para a superfície, escapando do metal sólido) e o hidrogênio residual (aquele que se difunde somente a temperaturas acima de 373 K (100°C))/2/. A figura 2.13 /17/ mostra a variação da velocidade de difusão do hidrogênio com a temperatura.

Empiricamente constatou-se que a determinação do hidrogênio difusível é adequada para especificação e classificação de consumíveis de soldagem, tais como, eletrodos revestidos e fluxos, já que na maioria das situações a quantidade de hidrogênio residual é apenas uma pequena fração do hidrogênio total. O hidrogênio difusível é medido em volume (ml) de hidrogênio por 100 g de metal depositado, e suas faixas típicas permissíveis estão assim escalonadas /2/:

muito baixa	<	5 ml/100 g
baixa		5-10 ml/100 g
média		10-15 ml/100 g
alta	>	15 ml/100 g

Uma preocupação dos pesquisadores tem sido a de reduzir ao máximo a absorção dos gases solúveis na poça de fusão. Uma maneira é introduzindo gases insolúveis na atmosfera do arco, para reduzir a pressão parcial dos gases solúveis ali contidos. O volume de um certo gás que um metal pode absorver, é limitado ao seu ponto de saturação, o que depende de sua temperatura e pressão parcial. Por exemplo, o carbonato de cálcio tem sido introduzido nos revestimentos dos eletrodos, para gerar gás carbônico, que na qualidade de gás insolúvel, reduz a pressão parcial dos gases solúveis na poça de fusão.

Tem-se demonstrado recentemente que além da ressecagem do eletrodo, ou tratamento térmico de pré ou pós soldagem é possível reduzir o conteúdo de hidrogênio difusível, no metal de solda produzido por eletrodos básicos, adicionando-se pequenas quantidades de elementos superficiais ativos como o Te, Se e S. O de maior efeito é o Te. Estes elementos atuam como uma barreira para a reação de transferência de hidrogênio nas interfaces: atmosfera/banho metálico, atmosfera/banho de escória e escória/metálico, impedindo desta forma, um maior nível de absorção de hidrogênio pelo metal fundido /12/.

2.3.3 - Relação Umidade versus Hidrogênio.

Na tentativa de relacionar o teor de umidade dos revestimentos com o nível do hidrogênio nas juntas soldadas, Hirai e colaboradores /10/, construíram gráficos relacionando as seguintes variáveis:

- umidade absorvida;
- umidade combinada: obtida pelo método de "Karl-Fisher" com aquecimento a 1273 K (1000°C) (umidade absoluta);
- pressão parcial na atmosfera do arco: conseguida através de revestimentos com diferentes adições de carbonato;
- hidrogênio difusível: obtido pelo processo de extração utilizando-se mercúrio como líquido coletor.

Os gráficos foram obtidos, relacionando-se separadamente as três primeiras variáveis acima com a última como mostram as figuras 2.14, 2.15 e 2.16. Com base nos resultados concluíram ser possível relacionar teor de umidade nos revestimentos com volume de hidrogênio difusível, advindo a seguinte equação:

$$(Hd)^2 = 260 a_1 + 30 a_2 + 0,9 b - 10$$

- onde: Hd - é o volume de hidrogênio difusível (ml/100g)
- a_1 - umidade da água quimicamente combinada (% por peso)
- a_2 - umidade absorvida (% por peso)
- b - pressão parcial do gás (mm de Hg)

Uma conclusão importante decorrente da relação, é que a contribuição da umidade absorvida pelo revestimento para formação de hidrogênio difusível é bem menor que da umidade combinada, tendo em vista que, grande parte daquela é eliminada em consequência do aquecimento do próprio eletrodo, durante a soldagem, por efeito Joule.

2.3.4 - Ensaio de Soldabilidade.

A finalidade destes ensaios é avaliar a formação e propagação das trincas a frio e como são influenciadas pelo teor de hidrogênio, microestrutura, temperatura e tensão. Salienta-se que nenhum destes ensaios representa a real condição da maioria das estruturas soldadas que são submetidas a esforços diversos, onde as condições de temperatura, tensão, fixação, etc., são muitas vezes imprevisíveis. Assim, nas condições de ensaio, adota-se maior rigor para que sejam superadas as condições de serviço.

Tipos de Ensaio - Existem dois grupos de ensaios de soldabilidade de aços para avaliação de trincas a frio causadas pelo hidrogênio: os de auto restrição tais como Ensaio Tekken, Ensaio Lehigh e o de Severidade Térmica Controlada e os ensaios com restrição externa, tais como Ensaio de Restrição Rígida, de Restrição Tensionada e o de Implante.

Os ensaios de auto restrição são aqueles em que as características ou concepção da junta soldada ou das peças que a compõe geram tensões internas provenientes principalmente de retração durante o resfriamento, influenciando sobremaneira no risco de ocorrência de trincas a frio.

Ensaio de restrição externa são aqueles em que as tensões aplicadas ao corpo de prova são provenientes de agentes externos, podendo ser controladas, conforme a necessidade do ensaio.

Ensaio Lehigh - A finalidade deste ensaio, de auto restrição, é avaliar, durante a formação das trincas a frio a influência de variáveis como:

- eletrodo (tipo, diâmetro, etc.)
- metal de base (tipo, espessura, etc.)
- condições de soldagem (amperagem, voltagem, velocidade, etc.)

A figura 2.17 ilustra um corpo de prova utilizado neste ensaio. Para reduzir a ocorrência de trincas pelo nível de tensão, aplicam-se cortes de serra nas laterais do corpo de prova possibilitando maior acomodação. Com isto evita-se a rigidez decorrente da contração causada pelo resfriamento da junta /1/.

Ensaio de severidade térmica controlada - É, possivelmente, o mais popular ensaio para avaliação de trincas a frio causadas pelo hidrogênio na ZTA, de juntas em ângulo. O ensaio consiste em utilizar duas placas presas no centro por um parafuso e separadas por um calço, com a finalidade de aumentar o nível de tensão aplicado à solda. As placas recebem soldas de restrição em duas arestas e soldas de ensaio nas arestas opostas como ilustra a figura 2.18 /1/.

Ensaio de restrição rígida - Avalia-se através deste ensaio os efeitos do nível de tensão nas trincas de raiz. A figura 2.19 ilustra um corpo de prova usado neste ensaio. Utiliza-se um comprimento constante como referência para verificar a variação de tensão imposta ao corpo de prova. A força de reação é inversamente proporcional ao comprimento de referência, podendo as outras condições de soldagem permanecerem inalteradas. Durante o ensaio será obtido o comprimento de referência crítico, l_c , abaixo do qual a trinca ocorre, definindo-se a relação:

$$R_f = \frac{E \cdot e}{l_c}$$

onde: R_f - intensidade de restrição

E - módulo de elasticidade

e - espessura da placa

l_c - comprimento crítico de referência.

R_f representa a força desenvolvida por unidade de comprimento por unidade de solda contraída, em Kgf/mm.mm /1/.

Ensaio de restrição tensionada - É outro ensaio que avalia o efeito da tensão nas trincas de raiz como ilustra figura 2.20. Consiste em tracionar duas placas unidas pela solda de ensaio por longo período, até que a trinca a frio aconteça. Ela ocorre após um período de incubação que diminui conforme a força aumenta. Quanto maior a temperatura de pré-aquecimento das placas e menor o nível de hidrogênio difusível na junta, tanto maior será o valor crítico da tensão e isto é o desejável /1/.

Ensaio de implante - É o ensaio mais utilizado para avaliar como os níveis de tensão influenciam na formação das trincas a frio na ZTA. A figura 2.21 ilustra um corpo de prova utilizado neste ensaio. Trata-se de um corpo cilíndrico, com entalhes em uma extremidade o qual é implantado em um metal de base através de um depósito de solda. Quando a temperatura cai para 423K (150°C), aplica-se uma carga específica sobre o corpo implantado mantendo-se assim por um período de tempo /1/.

2.3.5 - Ensaio TEKKEK.

É um ensaio de auto restrição, para avaliação da influência do teor de hidrogênio, microestrutura e temperatura nas trincas induzidas pelo hidrogênio, no MS, através de chanfro em Y simétrico, ou na ZTA utilizando-se chanfro em Y oblíquo. A figura 2.22 ilustra o corpo de prova e a geometria do chanfro destinado a este ensaio. É um método muito utilizado internacionalmente por apresentar facilidade de elaboração, versatilidade, baixo custo, simplicidade de análise e boa reprodutibilidade /1/.

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 2.22 no corte X-X).

Por ocasião da aplicação, no corpo de prova, da solda de restrição, um gabarito de aço de 2mm de espessura deverá ser colocado na sua abertura central (fenda) e as placas presas, para que, concluída a solda, elas estejam devidamente niveladas e suas medidas dentro dos padrões convencionais. A solda de restrição deverá ficar com um reforço de aproximadamente 1mm, em ambos os lados, acima das faces planas das placas do corpo de prova. Se o local da solda de restrição for um duplo V, o primeiro passe da solda de raiz, deverá ser limpo antes da colocação do segundo.

Métodos para medição de trincas - Através de experiências realizadas, utilizando-se testes de emissão acústica, com corpo de prova TEKKEK de 19mm de espessura, ALCANTARA e ROGERSON /18/ concluíram que a trinca a frio pode ocorrer num espaço de até 48 horas. Baseando-se nestas informações, para corpos de prova deste tipo é importante que somente após este intervalo, seja ele seccionado para os devidos testes.

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. O grau de susceptibilidade à trincas de um aço, expressa-se em termos percentuais através do IMT. A figura 2.23 ilustra e explica a execução do método.

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 /18/:

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

Para que os métodos citados sejam desenvolvidos, 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 2.24 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 2.25 podendo-se utilizar na operação uma serra elétrica. A parte central do corpo de prova, onde se encontra a solda de teste, é submetido a um forno, previamente aquecido a 673K (400°C), aí permanecendo 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 que a parte não trincada antes, apresenta aspecto de fratura nova. A figura 2.26 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 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 2.26. O uso do mapa pode não ser sempre satisfatório porque a trinca não aparece sempre com o aspecto mostrado na figura /19/.

2.3.6 - Métodos de Prevenção.

Inúmeras técnicas foram desenvolvidas com a finalidade de evitar ou minimizar os problemas de trincas a frio causadas pelo hidrogênio, tanto no metal de solda quando na zona termicamente afetada.

A ação de cada uma dessas técnicas deverá estar voltada diretamente ao processo e procedimento de soldagem, bem como o estado dos consumíveis a serem utilizados. Um exemplo seria a utilização de um processo que pudesse utilizar alta energia de soldagem do tipo arco submerso. Os processos automáticos, e semi-automáticos que possuem controle de técnica mais apurado e repetitivo geram também produtos com menor concentração de trincas /2/.

Com relação aos consumíveis as precauções estariam inerentes à eliminação principalmente da umidade dos revestimentos ou fluxos, que são os maiores introdutores de hidrogênio na junta soldada.

Assim foram estabelecidas fórmulas, tabelas e gráficos, que fornecem parâmetros e precauções que devem ser tomadas para se evitar as trincas a frio. Entretanto existem restrições devido a grande variedade de aços, espessuras, energias de soldagem, processos de soldagem, etc. A seguir alguns procedimentos são apresentados.

Ressecagem - Um grande passo para se obter uma junta soldada sem defeitos, sobretudo quando se está operando com eletrodos de baixo hidrogênio, é a certeza de que seus revestimentos estão com nível de umidade nos limites estabelecidos pelas normas vigentes. Esta condição é viável, desde que se adote as condições de ressecagem, apresentadas no item 2.2.5 deste capítulo.

Carbono equivalente (CE) - Para aços carbono de alta ou baixa resistência, quanto mais frágil apresenta-se a microestrutura da ZTA e do MS, maior será o risco de trincas a frio. Estando a microestrutura diretamente relacionada com os elementos químicos que compõem os aços, foram equacionadas várias fórmulas para representar a influência destes elementos na formação das trincas a frio. Dentre estas fórmulas, a mais simples e mais utilizada é a do carbono equivalente elaborada pelo Instituto Internacional de Soldagem.

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

Embora tendo limitações, admite-se a possibilidade de trincas a frio se $CE \geq 0.4$ /1/. Entretanto foi apresentada uma fórmula mais elaborada para aços com teor de carbono menor que 0.10%. Esta fórmula foi desenvolvida por Ito-Bessyo (Pcm) para ser aplicada juntamente com os seguintes parâmetros: (Pw) parâmetro de Ito-Bessyo, (Hd) teor de hidrogênio difusível e (Rf) nível de restrição. A fórmula é a seguinte:

$$P_{cm} = C + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 58$$

Temperatura crítica de pré-aquecimento de Ito-Bessyo (To) - A finalidade do processo é evitar as trincas a frio através da aplicação de uma temperatura mínima de pré-aquecimento (To) dada pela seguinte fórmula /1/:

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

onde Pw é função de Pcm, Hd e Rf pela relação seguinte:

$$P_w = P_{cm} + \frac{H_d}{60} + \frac{R_f}{40.000}$$

Pw é válido para: $1000 \leq R_f \leq 3300$

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

$0.07\% \leq C \leq 0.18\%$ (aços de baixo carbono)

Parâmetro de trinca de Suzuki (Pha) - Neste processo relaciona-se a temperatura mínima de pré-aquecimento (To), o teor de hidrogênio difusível (Hd), o nível de restrição (Rf) e o carbono equivalente de Ito-Bessyo (Pcm) através da fórmula:

$$T_o = 146 P_{ha}$$

onde To representa a temperatura de pré-aquecimento aplicada com a finalidade de impedir a formação das trincas a frio. Pha seria assim relacionado /1/:

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

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

Valores aplicados à F:

$$(750 \leq Rf < 1000) \quad F = (6,32 + 2,6 \times 10^{-2} Rf) Pcm - 0,1 \times 10^{-2} Rf - 1,92$$

$$(1000 \leq Rf < 2090) \quad F = (7,71 + 1,19 \times 10^{-2} Rf) Pcm - 0,1 \times 10^{-2} Rf - 1,93$$

$$(2090 \leq Rf < 2720) \quad F = (4,55 + 2,67 \times 10^{-2} Rf) Pcm - 0,268 \times 10^{-2} Rf - 1,58$$

$$Rf \geq 2720 \quad F = 11,9 Pcm + 0,089 \times 10^{-2} Rf - 2,55$$

Limitações:

- valores obtidos com energia de soldagem fixa (1.7 kJ/mm)
- aplicados a aços com teor de carbono $\leq 0.18\%$
- depósitos de solda em um único passe
- aplicados para chapa com espessura variando de 20 a 50mm.

Dureza máxima de Suzuki (Hmax) - A dureza máxima (Hmax) da ZTA de aços de alta resistência soldados, é importante para se avaliar além da susceptibilidade às trincas a frio causadas pelo hidrogênio, a ductilidade da junta soldada e a susceptibilidade às trincas por corrosão sob tensão. A fórmula apresentada por Suzuki utilizou-se das constantes H^∞ , X, Y, Z e α ; do valor de carbono equivalente de Ito-Bessyo (Pcm %), do teor de carbono (C %) e do tempo de resfriamento de 1073 para 773 K (800/500°C) /2/.

$$H_{max}(Hv \cdot 10) = H^\infty + \frac{X}{1 + \exp(\alpha (Y-Z))}$$

$$H^\infty = 884 C + 287 - X$$

$$X = 237 + 1633 C - 1157 Pcm$$

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

$$Z = 0,03 - 6,00 + 7,77 Pcm$$

$$Y = \log t(8/5) \text{ Tempo de resfriamento de } 1073 \text{ para } 773 \text{ K (800/500}^\circ\text{C)}$$

Diagrama de eficiência de Bernard -

Relaciona a dureza máxima da ZTA às trincas a frio causadas pelo hidrogênio. São considerados os seguintes parâmetros:

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

Obtem-se a partir do diagrama, figura 2.27, o tempo de resfriamento. Com este valor consulta-se um outro gráfico, figura 2.28, elaborado para aços Mn de alta resistência, para determinação da dureza máxima. O tempo obtido deverá ser usado na redução da temperatura de 973 para 573 K (700/300°C) advindo daí uma dureza ideal na ZTA para determinar uma mínima possibilidade de formação de trincas /1/.

Norma Britânica BS 5135 - A norma britânica

"Metal Arc Welding of Carbon Manganese Steels" BS 5135 de 1974 prevê através de gráficos e tabelas, temperaturas mínimas de pré-aquecimento, energia de soldagem indicada e diâmetro do eletrodo a ser utilizado, para se evitar as trincas a frio causadas pelo hidrogênio na ZTA. Este método leva em consideração a composição química do metal de base, a temperatura de pré-aquecimento, a espessura combinada, os parâmetros de energia de soldagem e tipos de consumíveis de soldagem. Estes gráficos e tabelas não são apropriados para teor de carbono menor que 0,10% e em caso de soldagem em placas com mais de 50 mm de espessura. É aplicável em aços ao carbono, ao carbono-manganês, e aços de alta resistência e baixa liga, podendo, em alguns casos, ser aplicável para se evitar trincas a frio no MS /1/.

Diagramas de previsão de Alcântara - Estes

diagramas, figura 2.29, foram obtidos a partir de resultados experimentais através da soldagem de aços estruturais utilizando-se eletrodos básicos com diferentes limites de resistência. Avalia-se a tendência para formação de trincas no MS, relacionando-se o coeficiente médio de trincas, o teor de hidrogênio difusível e a energia de soldagem. Uma vez conhecido o teor de hidrogênio difusível, é possível pelo diagrama, estabelecer um valor mínimo para energia do arco com a finalidade de evitar a trinca. Por analogia, conhecendo-se a energia conveniente, obtém-se o nível crítico de hidrogênio difusível /1/.

TABELAS E FIGURAS DO
CAPITULO - 2

Tabela 2.1 - Constituintes dos fluxos e suas principais funções /5/.

F U N Ç Ã O

Constituinte	Proteção Gasosa	Desoxidante	Viscosidade	Estabilização	Aglomerante	Elemento de Liga	Formador de Escória	Principal aplicação
Alumina			X	X				E, S
Orgânico	X	X						E
Carbonato Ca	X	X	X	X			X	E, T, S
Fluorita	X	X	X					E, T, S
Rutilo		X	X	X			X	E, T, S
Zirconia				X				E, S
Quartzo		X	X	X			X	E, T, S
Oxidos de Fe		X	X	X			X	E, S
Fe - Si		X				X	X	E, S
Fe - Mn		X				X	X	E, S
Oxido de Na		X		X				E, T, S
Silicato Na			X	X	X		X	E, T, S
Silicato de K				X	X		X	E, T, S
Dióxido de Mn				X			X	E, T, S
Feldspato			X	X			X	E
Asbestos			X	X	X		X	E
Talco		X	X	X			X	E
Argilas			X	X	X		X	E

Eletrodo revestido : E
 Arame tubular : T
 Arco submerso : S

Tabela 2.2 - Exemplo de composição química dos principais tipos de revestimentos /5/.

T I P O

Composto	Ácido	Rutílico	Celulósico	Básico
TiO ₂	5	40	2	2
SiO ₂	15	10	15	10
ZrSiO ₄	2	-	5	-
CaCO ₃	10	20	15	35
CaF ₂	-	-	-	35
MnO	20	5	10	-
MnO ₂	20	-	-	-
FeO	20	5	8	-
Fe - Si	-	-	-	6
Mica	-	15	-	-
Ferroliga	-	Variável	-	Variável
Celulose	-	-	35	-

Tabela 2.3 - Exemplos Típicos de Constantes de Fusão. /3/

Tipo de eletrodo	bitola	Cf em $\frac{\text{(grs)}}{\text{(A.min)}}$
Ácido	3,15	0,167
	4	0,167
	5	0,170
	6,3	0,170
Básico	3,15	0,160
	4	0,168
	5	0,170
	6,3	0,170
Alto rendimento em relação à alma ($\approx 100\%$)	3,15	0,240
	4	0,240
	5	0,260

Tabela 2.4 - Quantidade máxima de umidade permitida nos revestimentos dos eletrodos básicos de baixo hidrogênio - AWS A5.5-81 /8/.

CLASSIFICAÇÃO AWS	%
E7015-X	0,4
E7016-X	0,4
E7018-X	0,4
E8015-X	0,2
E8016-X	0,2
E8018-X	0,2
E9015-X	0,15
E9016-X	0,15
E9018-X	0,15
E10015-X	0,15
E10016-X	0,15
E10018-X	0,15
E11015-X	0,15
E11016-X	0,15
E11018-X	0,15
E12015-X	0,15
E12016-X	0,15
E12018-X	0,15
E12018-M1	0,10

Obs. O "X" substitui os sufixos A₁, B₂, C₃, M, etc. exceto para a classificação E 12018 - M₁.

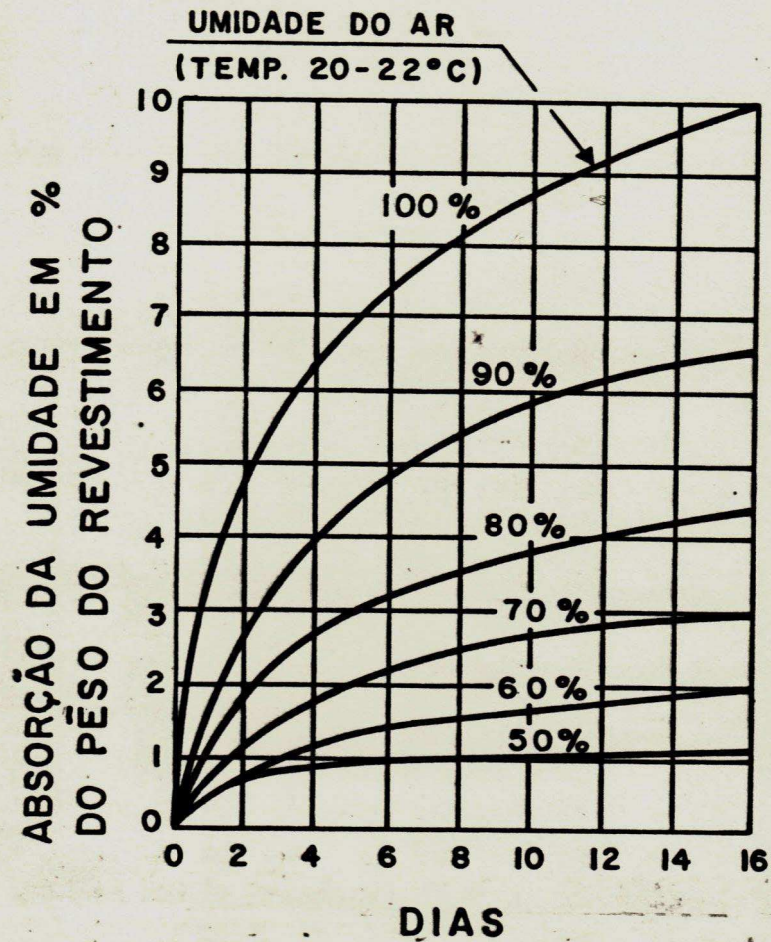


Figura 2.1 - Absorção de umidade nos revestimentos dos eletrodos básicos normais em função do tempo e do percentual de umidade do ar. /7/

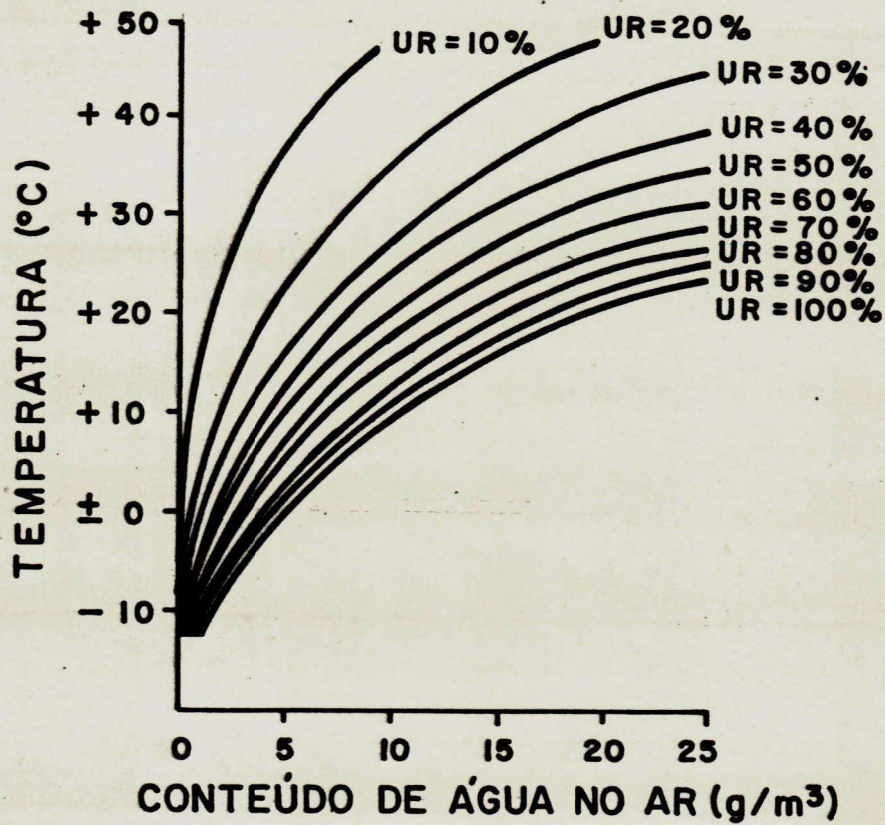


Figura 2.2 - Quantidade de água (g/m³) no ar em função da temperatura para vários percentuais de umidade relativa. /7/

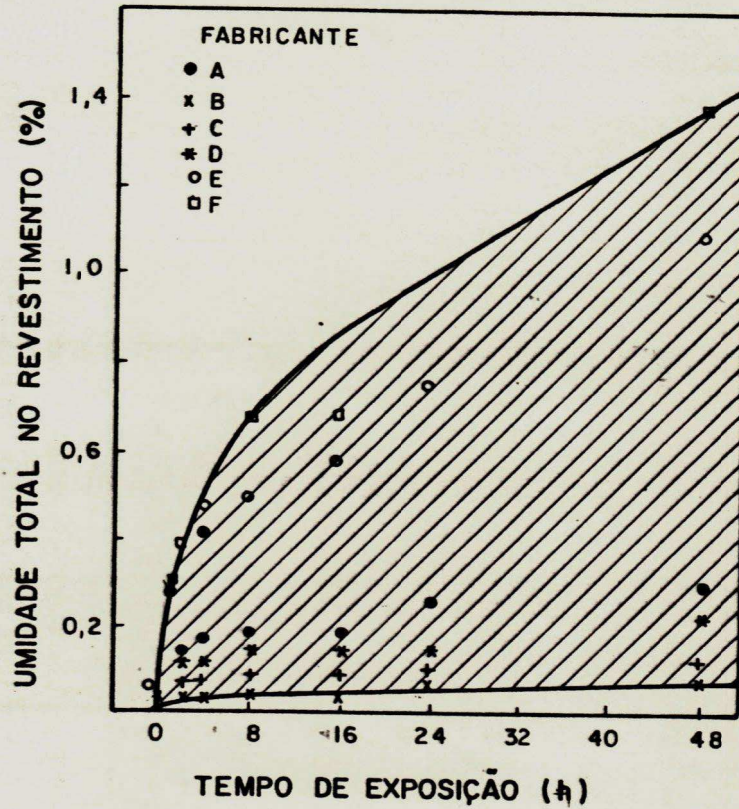


Figura 2.3 - Conteúdo de umidade em eletrodos AWS E 7018 G, expostos à uma atmosfera com 65 % de umidade relativa e 294 K (21°C) de temperatura. A área hachurada representa a faixa de variação de absorção de umidade entre os eletrodos ensaiados os quais, nominalmente atendem às especificações da mesma norma /5/.

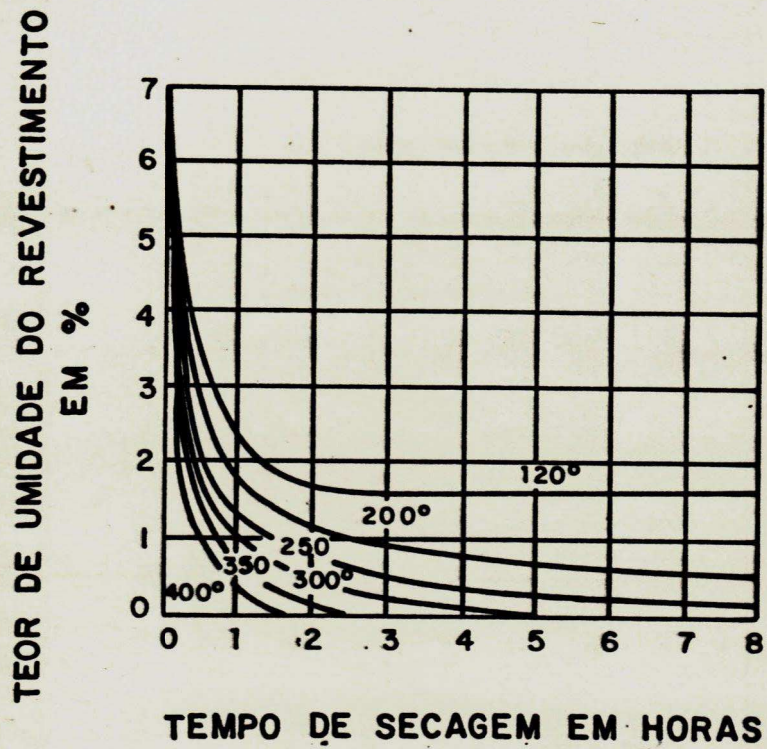


Figura 2.4 - Redução da umidade por secagem dos eletrodos. (Não considerar o tempo de aquecimento até o forno atingir a temperatura de secagem) /7/.

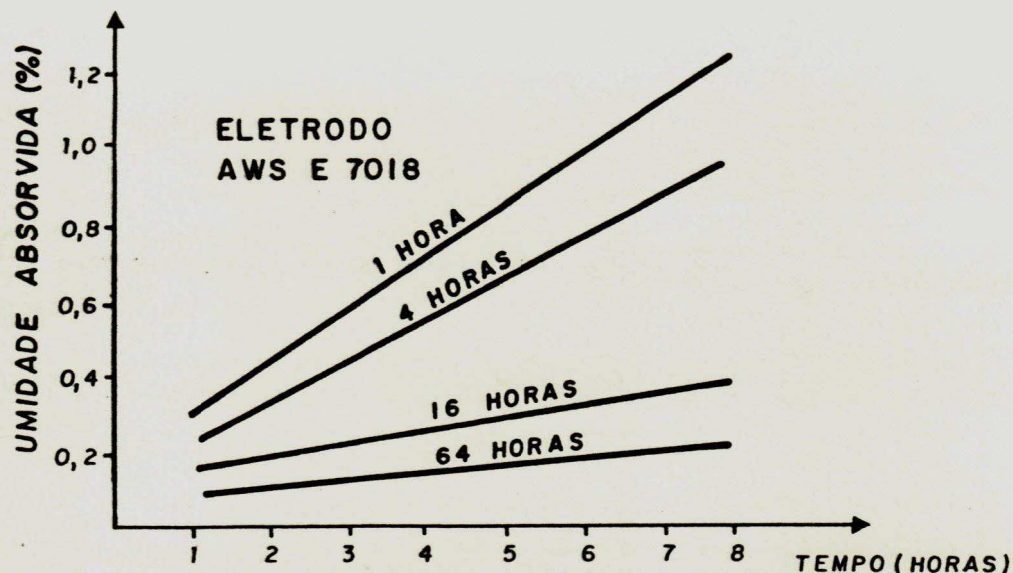


Figura 2.5 - Influência do tempo de ressecagem sobre a umidade absorvida a 301K (28°C) e 70% de umidade relativa. A temperatura de ressecagem foi de 692K (420°C) /12/.

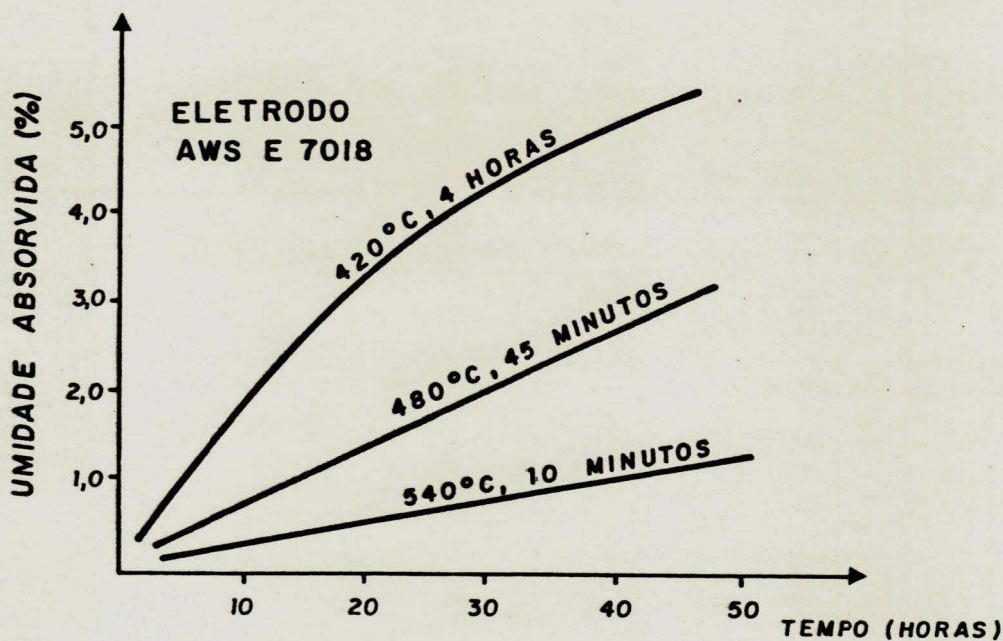


Figura 2.6 - Efeito da temperatura de ressecagem sobre a umidade absorvida a 301K (28°C) e 70% de umidade relativa /12/.

NOTA - Comparando-se as figuras acima, na condição de 420°C por 4 horas detectou-se uma inesplicável discrepância nos parâmetros umidade absorvida versus tempo. Contudo os gráficos reproduzidos não perdem seu valor ilustrativo.

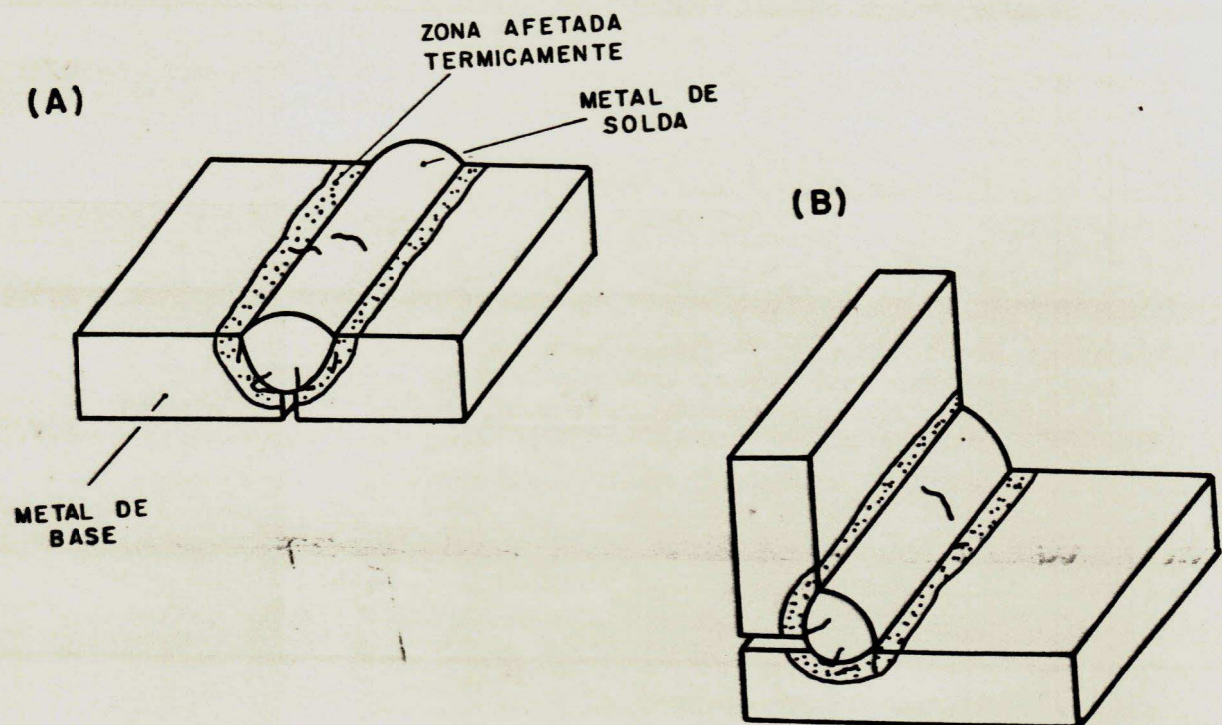


Figura 2.7 - Posições e orientações comuns das trincas a frio causadas pelo hidrogênio em (A) juntas de topo e em (B) juntas em ângulo /1/

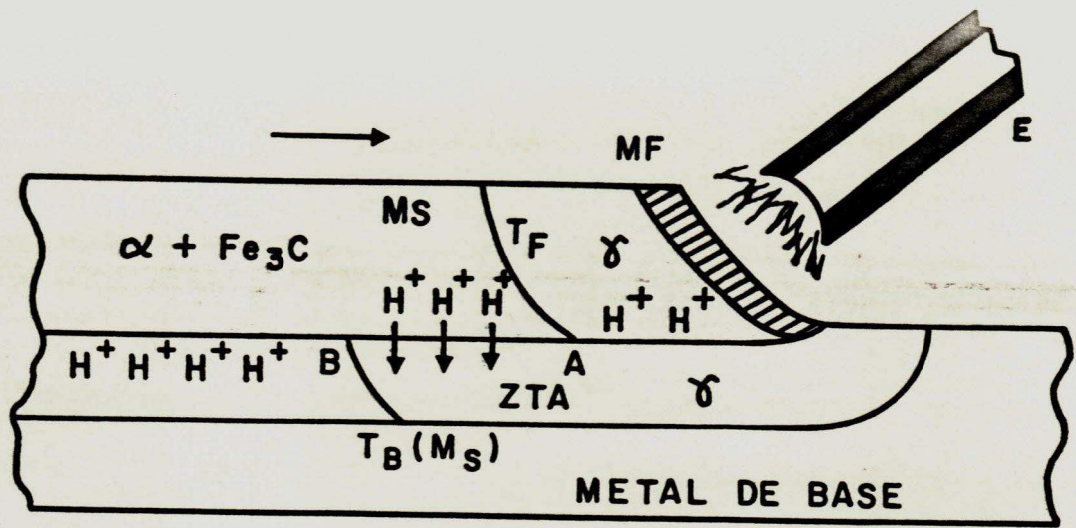


Figura 2.8 - Corte longitudinal de um cordão de solda a arco com eletrodo revestido, ilustrando o mecanismo de migração do hidrogênio à ZTA. /3//11/.

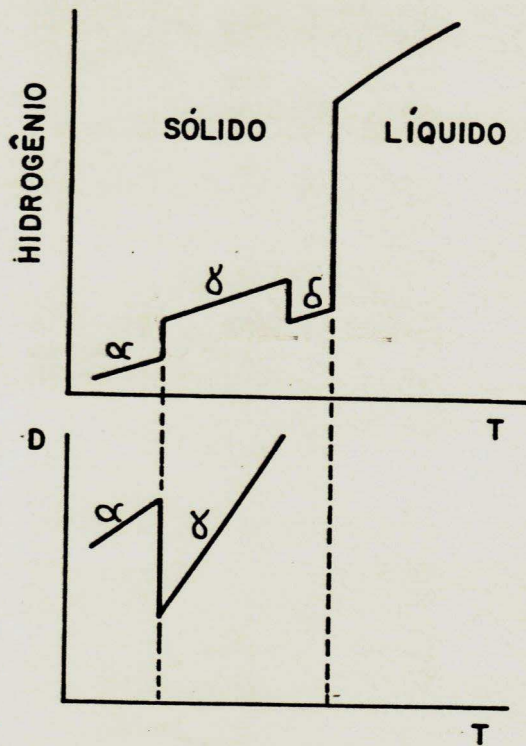


Figura 2.9 - A - Dissolução do hidrogênio em aço
 B - Coeficiente de difusão do hidrogênio. /13/

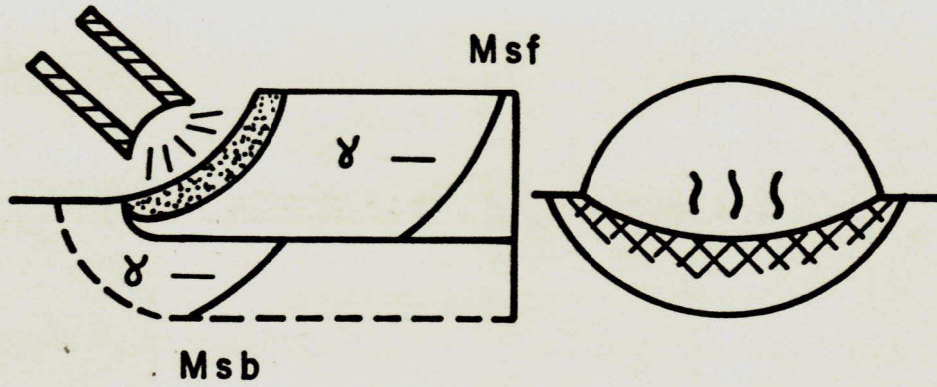


Figura 2.10 - Fissuração a frio no cordão /13/.

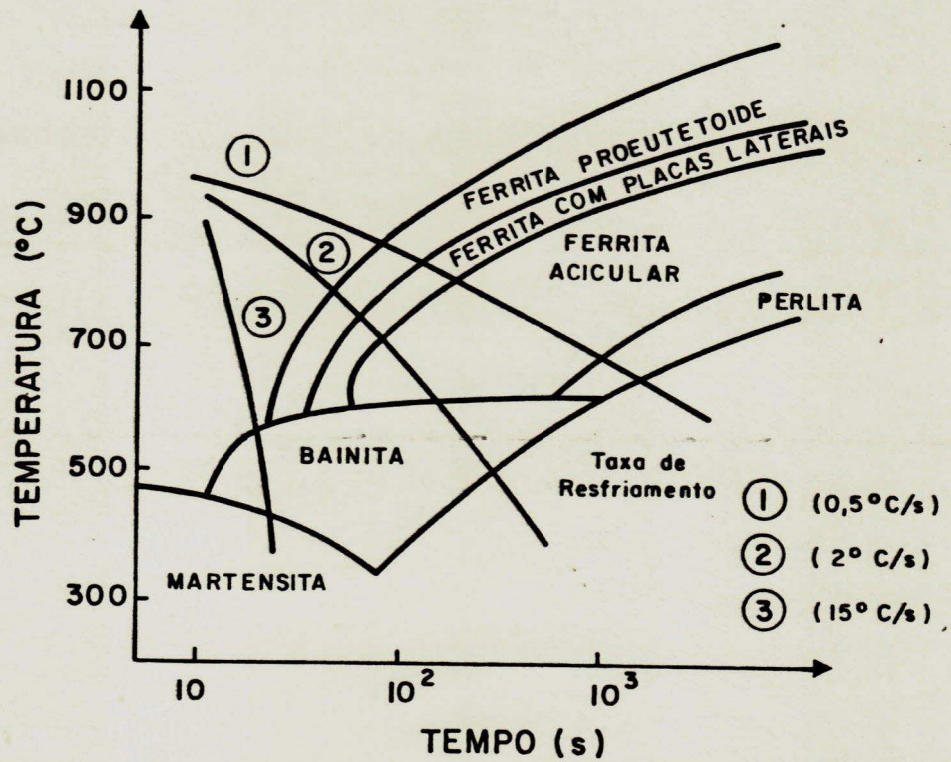


Figura 2.11 - Diagrama esquemático CCT mostrando o efeito de três taxas de resfriamento distintos sobre a microestrutura /2/.

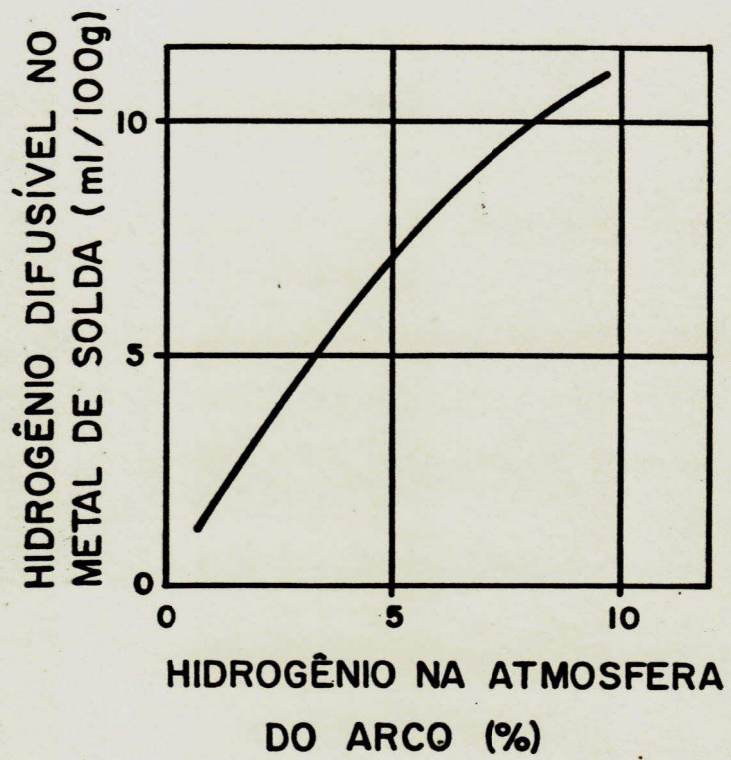


Figura 2.12 - Hidrogênio difusível no metal de solda da atmosfera do arco elétrico /16/.

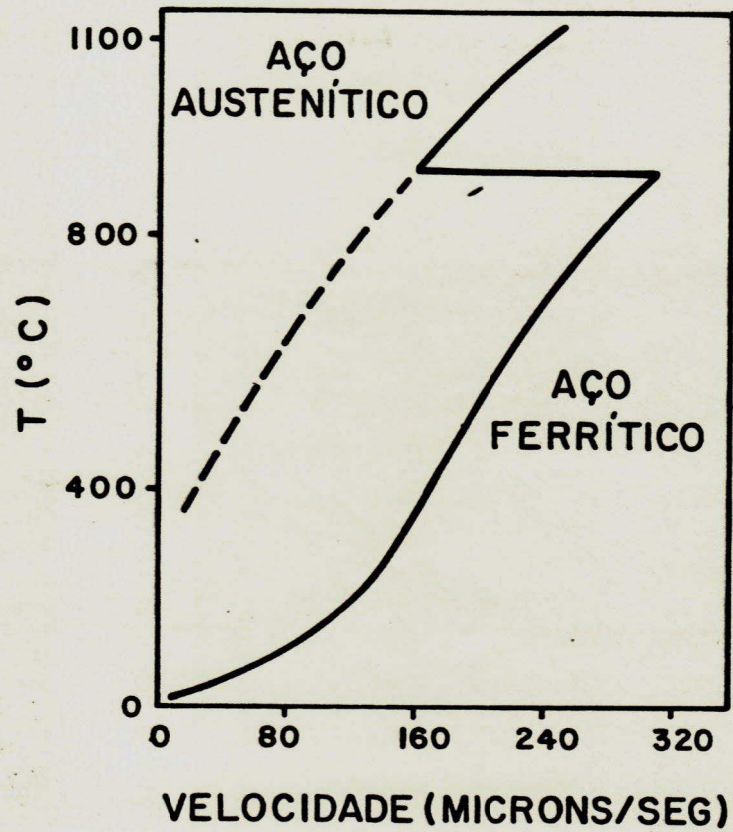


Figura 2.13 - Variação da velocidade de difusão do hidrogênio no aço, com a temperatura. /17/

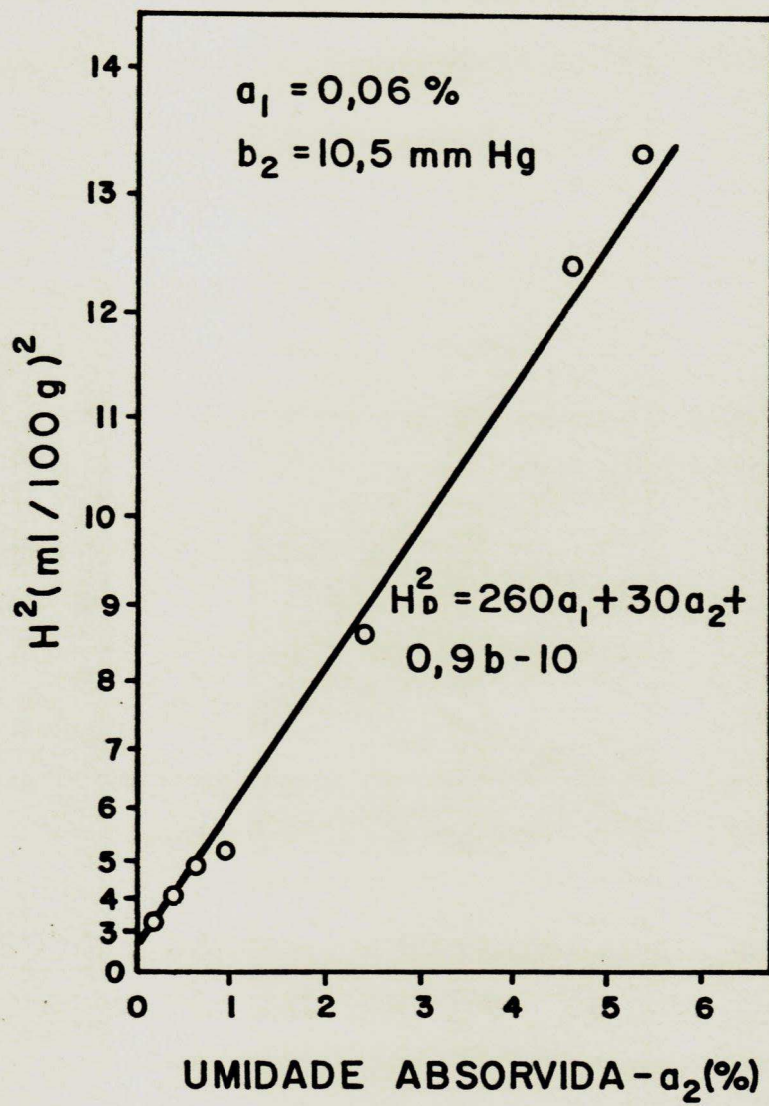


Figura 2.14 - Efeito da água absorvida no hidrogênio difusível /10/.

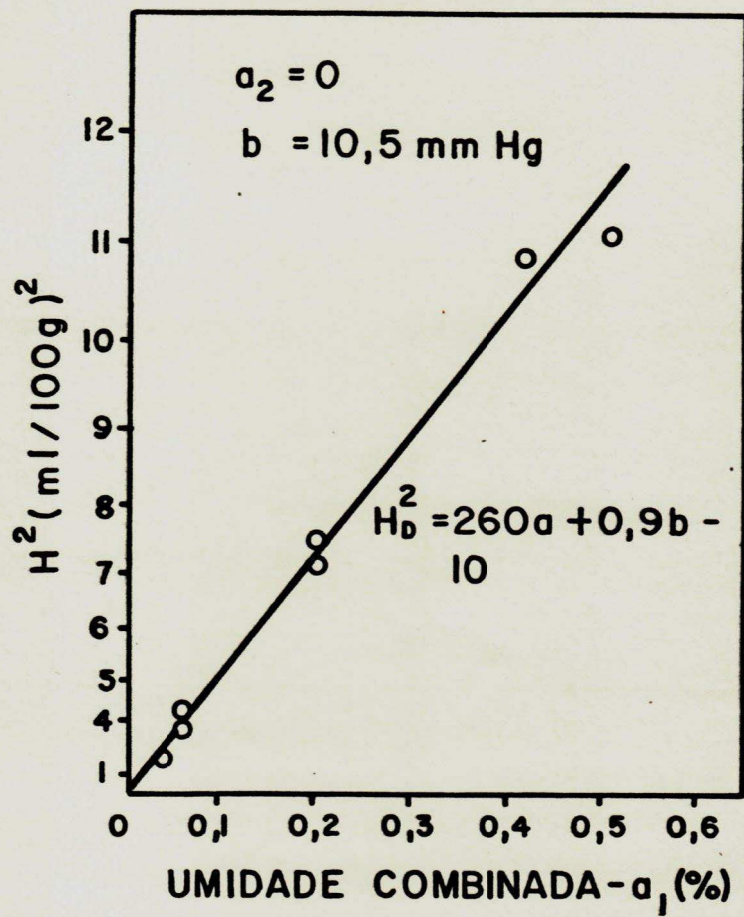


Figura 2.15 - Efeito da água combinada no hidrogênio difusível /10/.

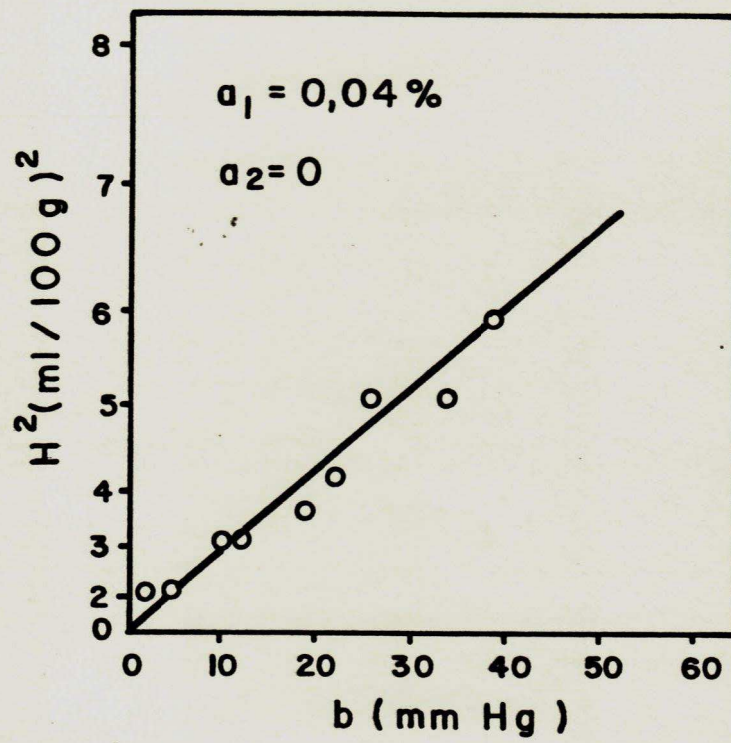


Figura 2.16 - Efeito da pressão parcial no hidrogênio difusível /10/.

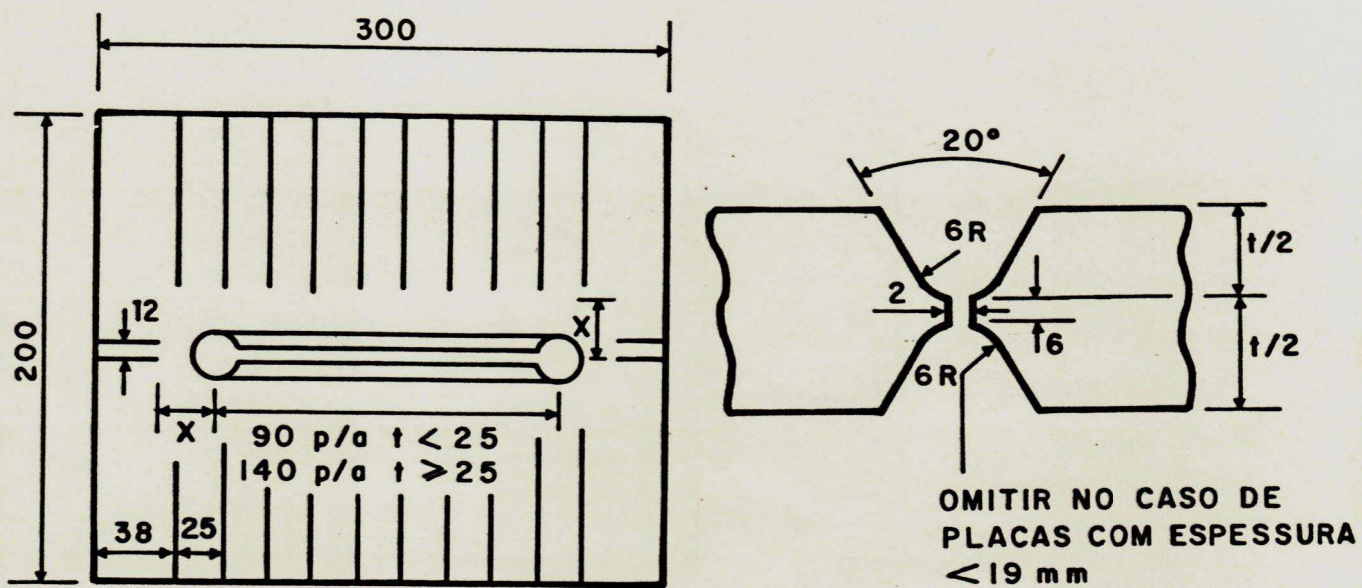


Figura 2.17 - Corpo de prova para avaliação de trincas a
 frio através de ensaio de auto restrição
 LEHIGH. /1/

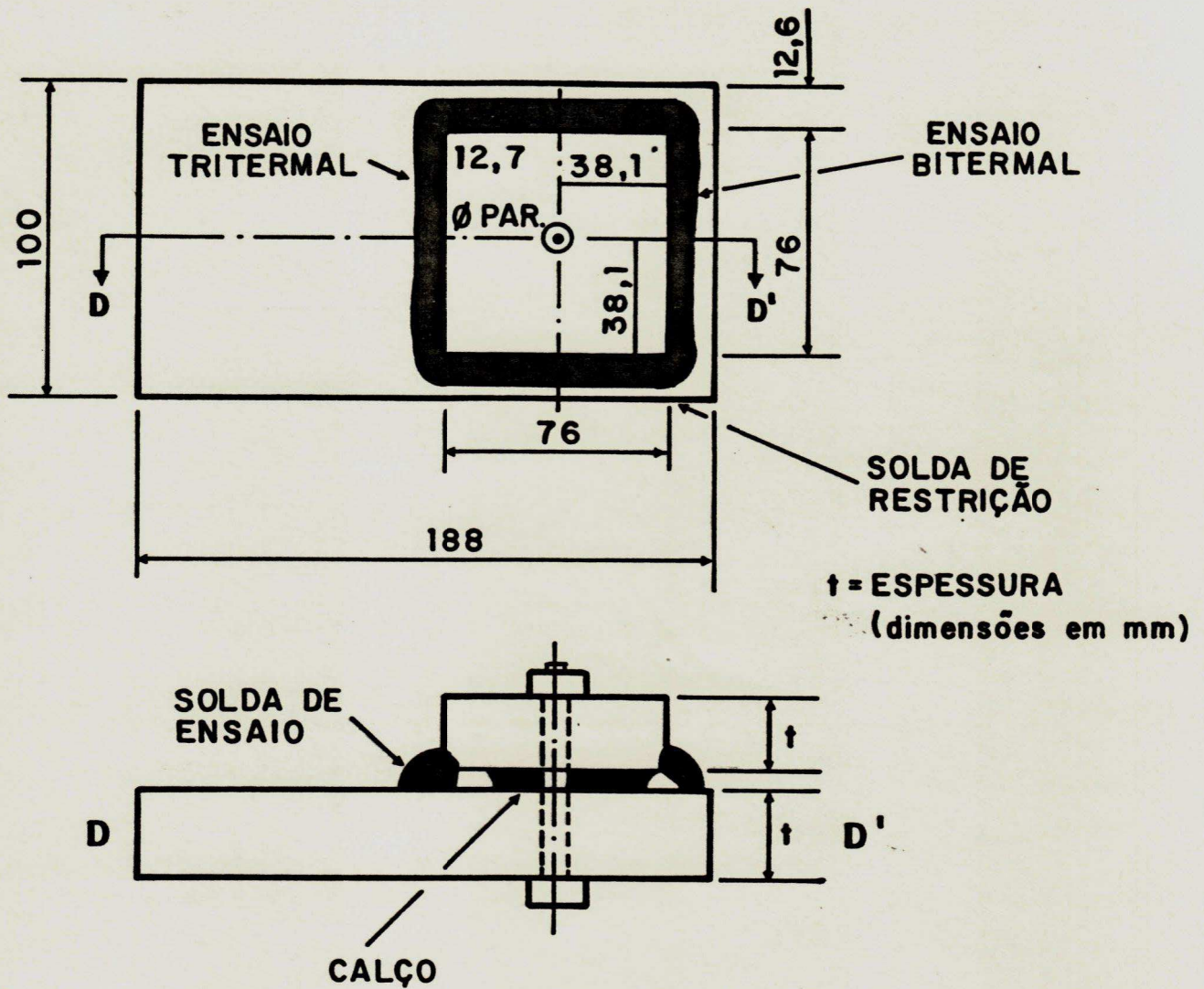


Figura 2.18 - Ensaio de severidade térmica controlada. /1/

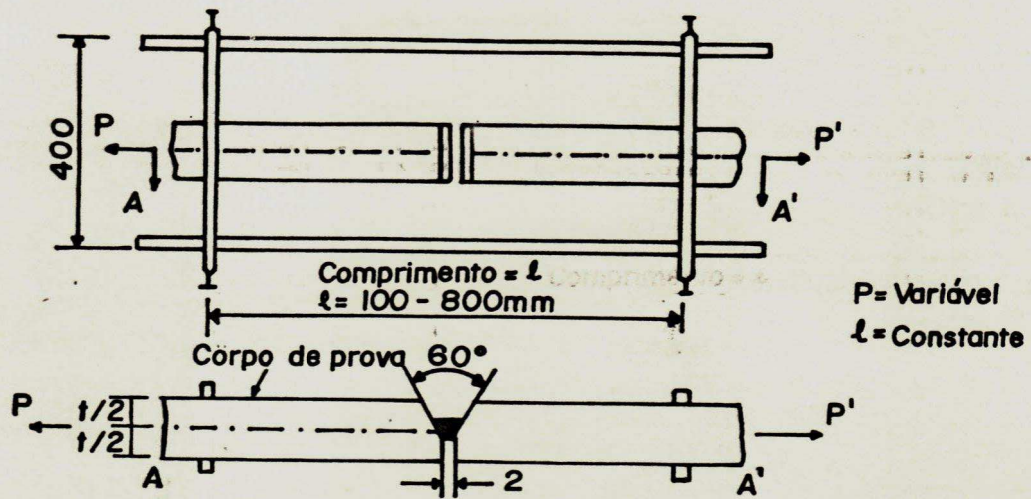


Figura 2.19 - Corpo de prova para ensaio de avaliação de trincas a frio de restrição externa. Ensaio de RESTRIÇÃO RÍGIDA. /1/

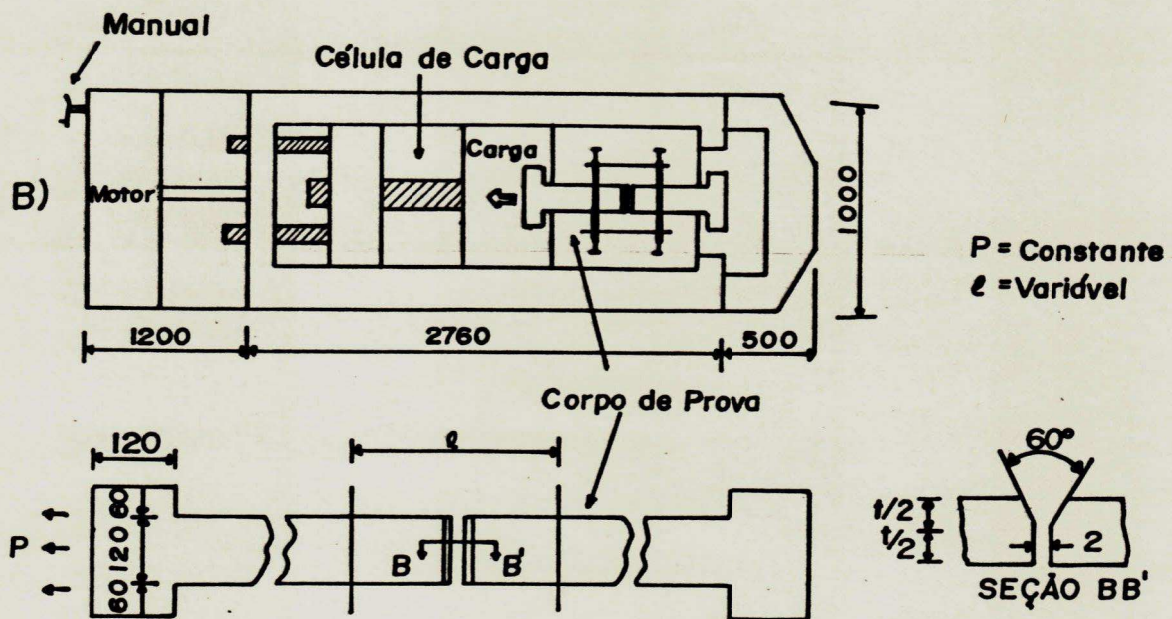


Figura 2.20 - Corpo de prova para avaliação de trincas a frio através de ensaio de restrição externa. Ensaio de RESTRIÇÃO TENSIONADA. /1/

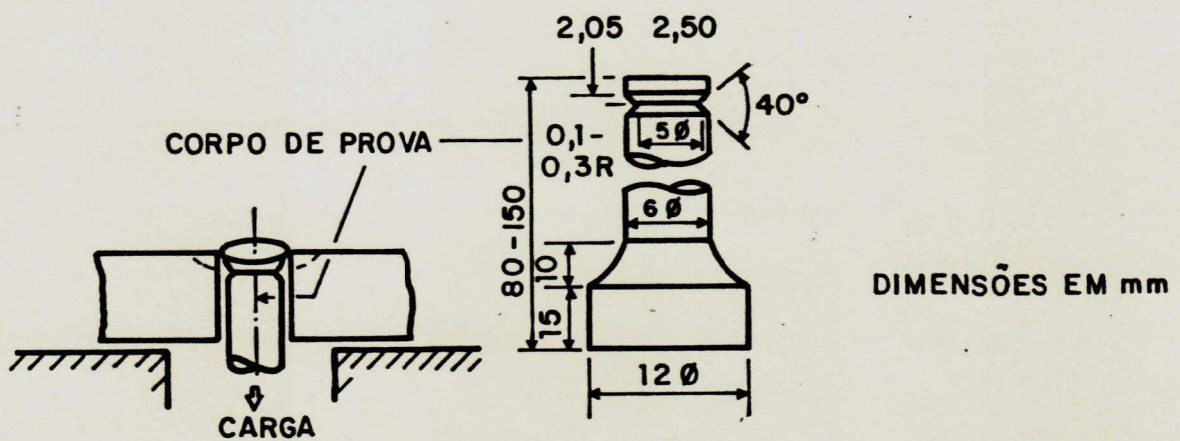
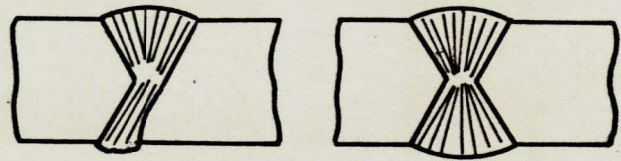
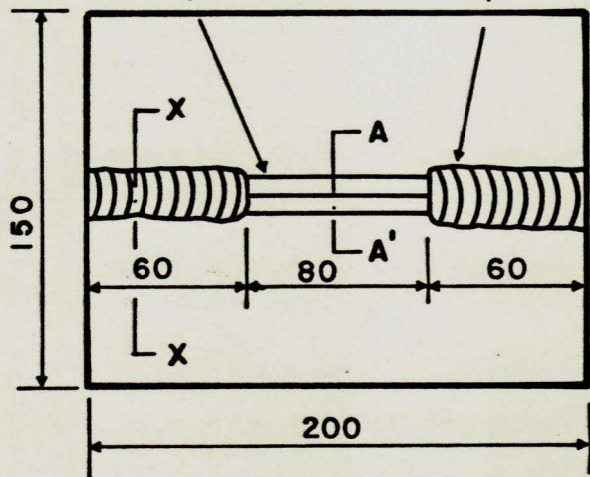


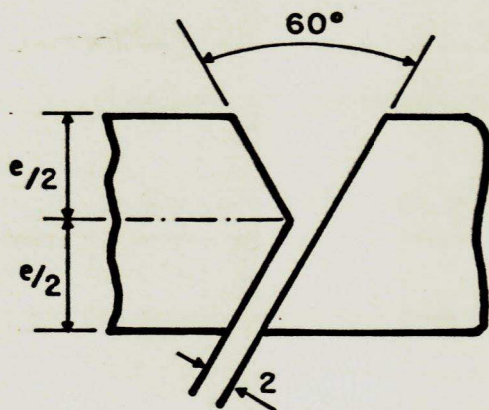
Figura 2.21 - Corpo de prova para ensaio de IMPLANTE.
 Este é também um ensaio de restrição externa. /1/

ESPAÇO P/A
SOLDA DE ENSAIO

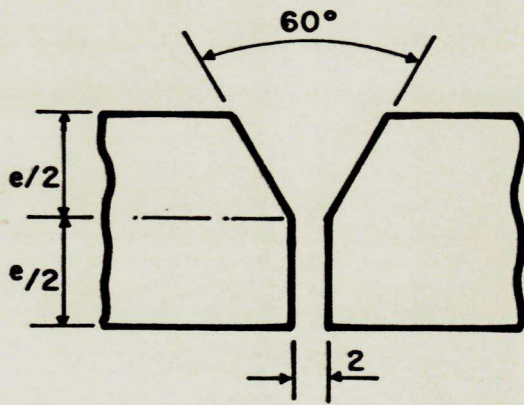
SOLDA DE RESTRIÇÃO



SEÇÃO X-X (alternativas)



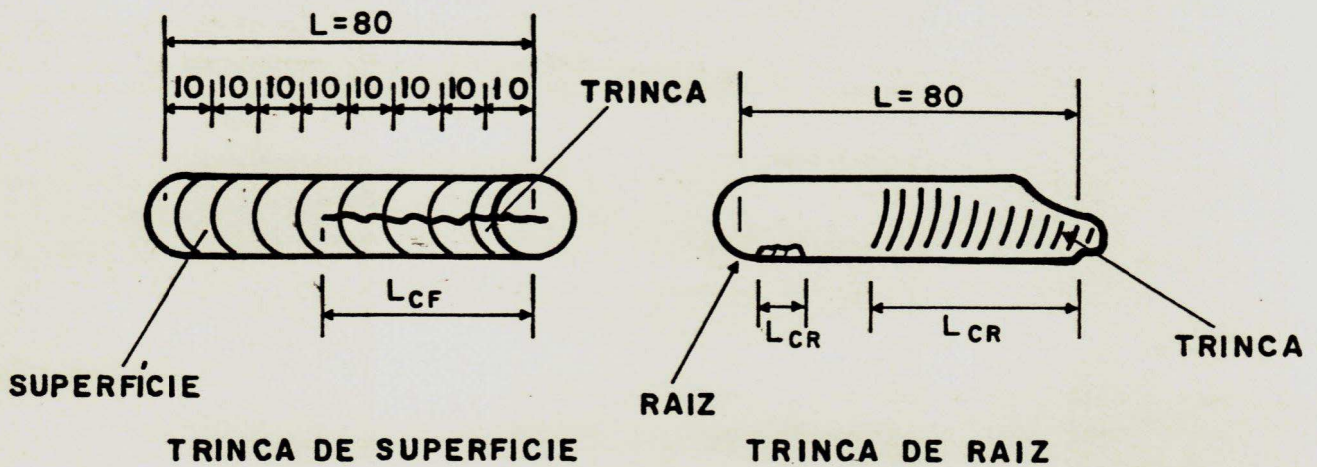
SEÇÃO-AA'



SEÇÃO-AA'

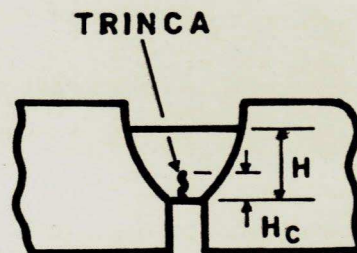
e = ESPESSURA
DIMENSÕES EM mm

Figura 2.22 - Corpo de prova para ensaio de avaliação de trincas a frio, de auto restrição TEKKEK. /1/



$$C_s = \sum (L_{cf}/L) \cdot 100 \%$$

$$C_r = \sum (L_{cr}/L) \cdot 100 \%$$



PROFUNDIDADE DA TRINCA

$$C_b = \sum (H_c/H) \cdot 100 \%$$

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

Figura 2.23 - Índice de trincas no metal de solda. /18/

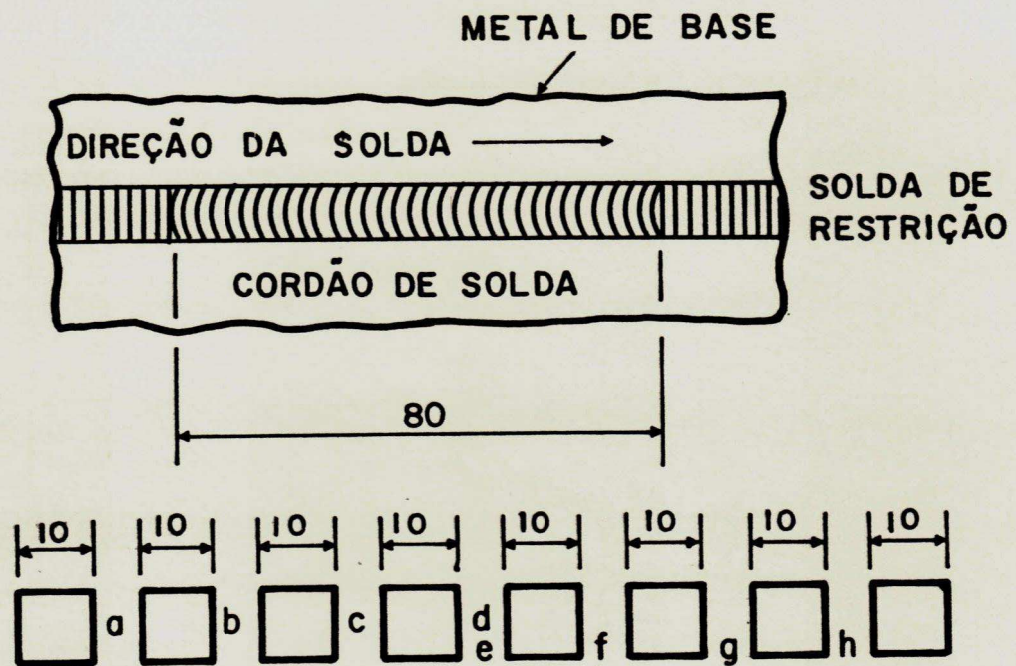


Figura 2.24 - Seleção das seções do cordão de solda para análise: a, b, c, d, f, g, e h são utilizadas para medição de trincas; a seção d para teste de dureza Vickers; seção e para exame metalográfico. (As dimensões são em mm). /18/

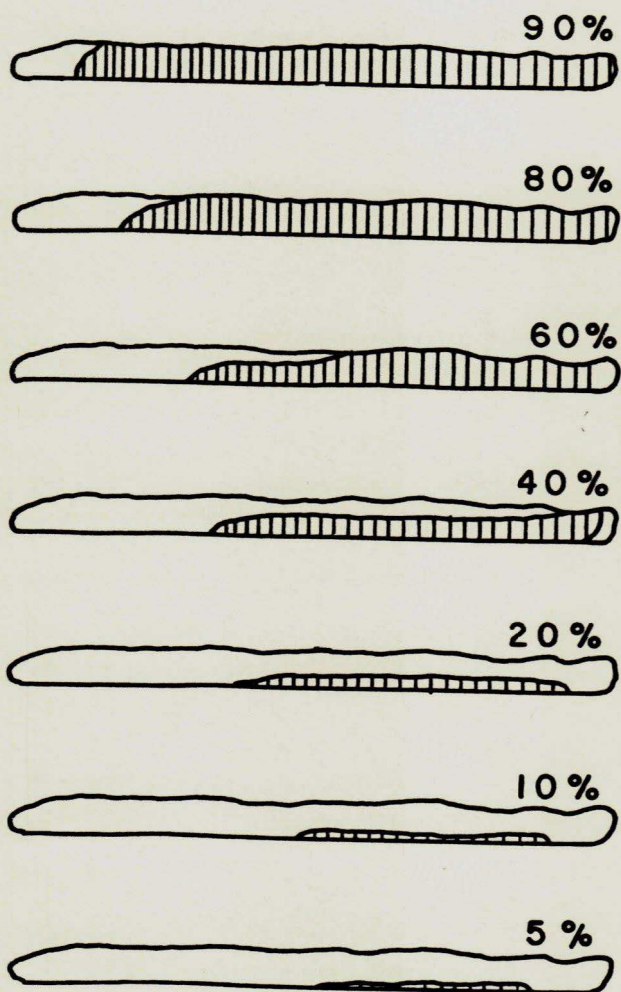


Figura 2.26 - Mapa com percentuais estimados do índice de trincas. Os valores percentuais são obtidos pela relação entre a área escurecida resultante da trinca induzida, oxidada pelo calor, e a área total fraturada do cordão de solda /19/.

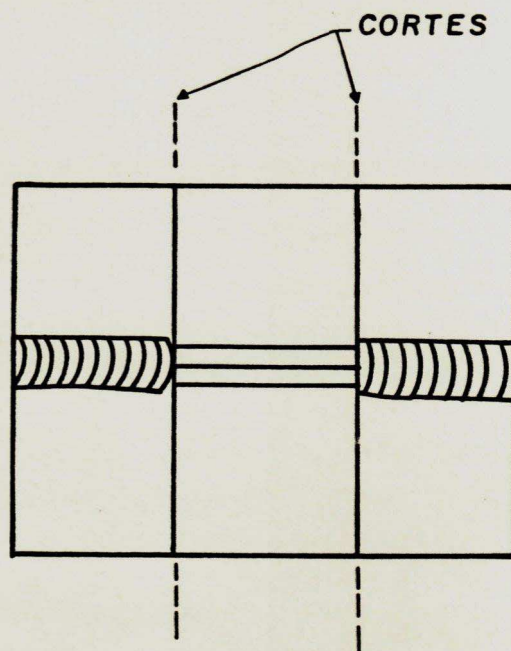


Figura 2.25 - Corte para isolamento da parte central do corpo de prova.

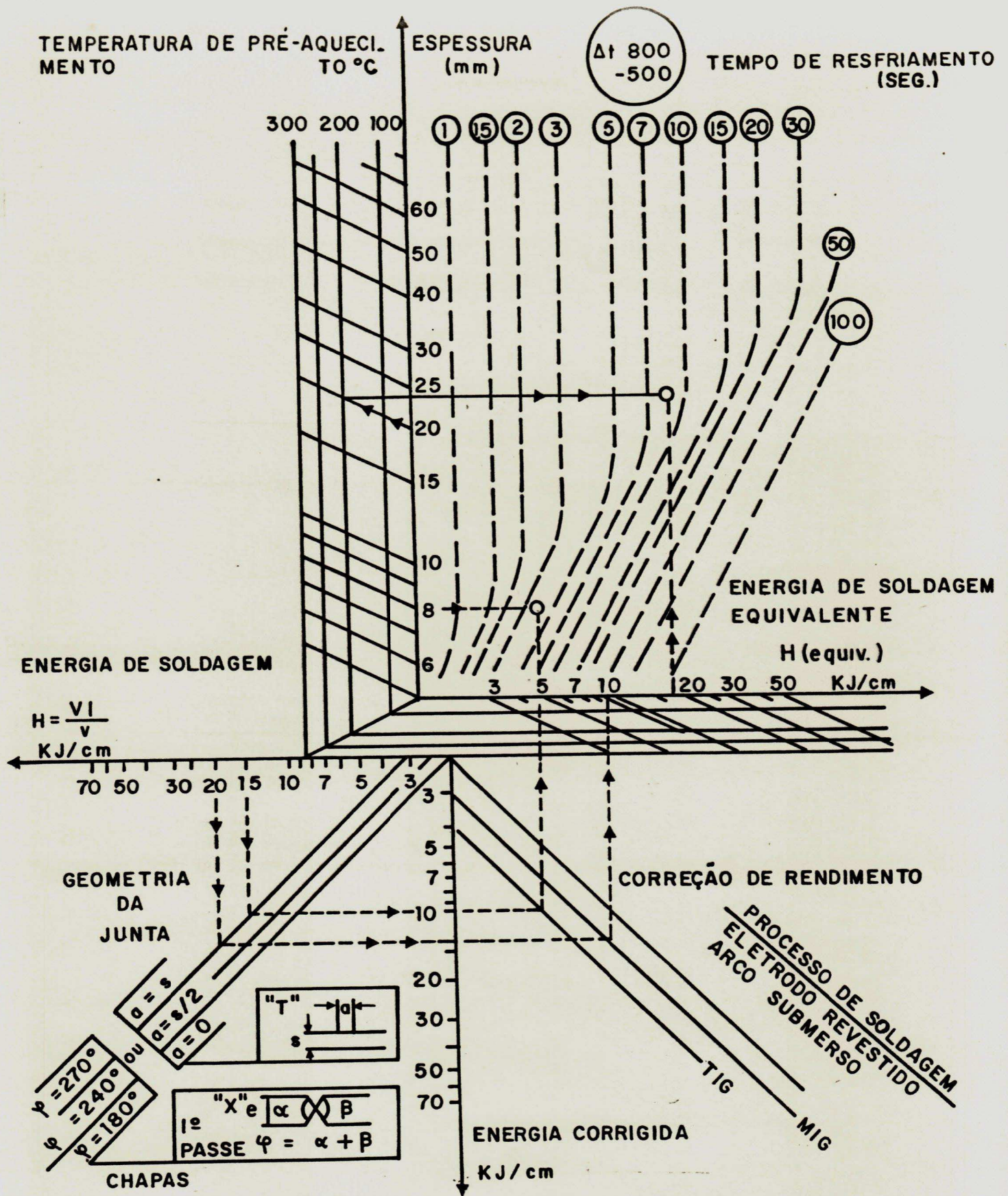


Figura 2.27 - Diagrama de eficiência térmica para tempo de resfriamento entre 1.073 e 773 K (800 e 500°C) em função das condições de soldagem. /13/

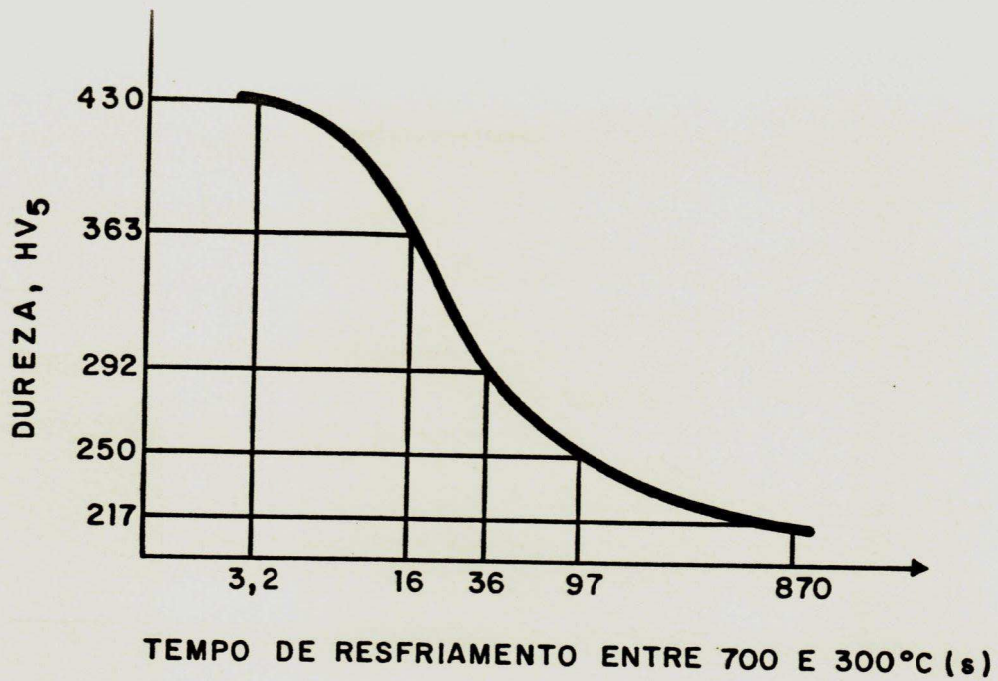


Figura 2.28 - Curva típica de dureza para aços C - Mn (0,16% C e 1,16% Mn). /1/

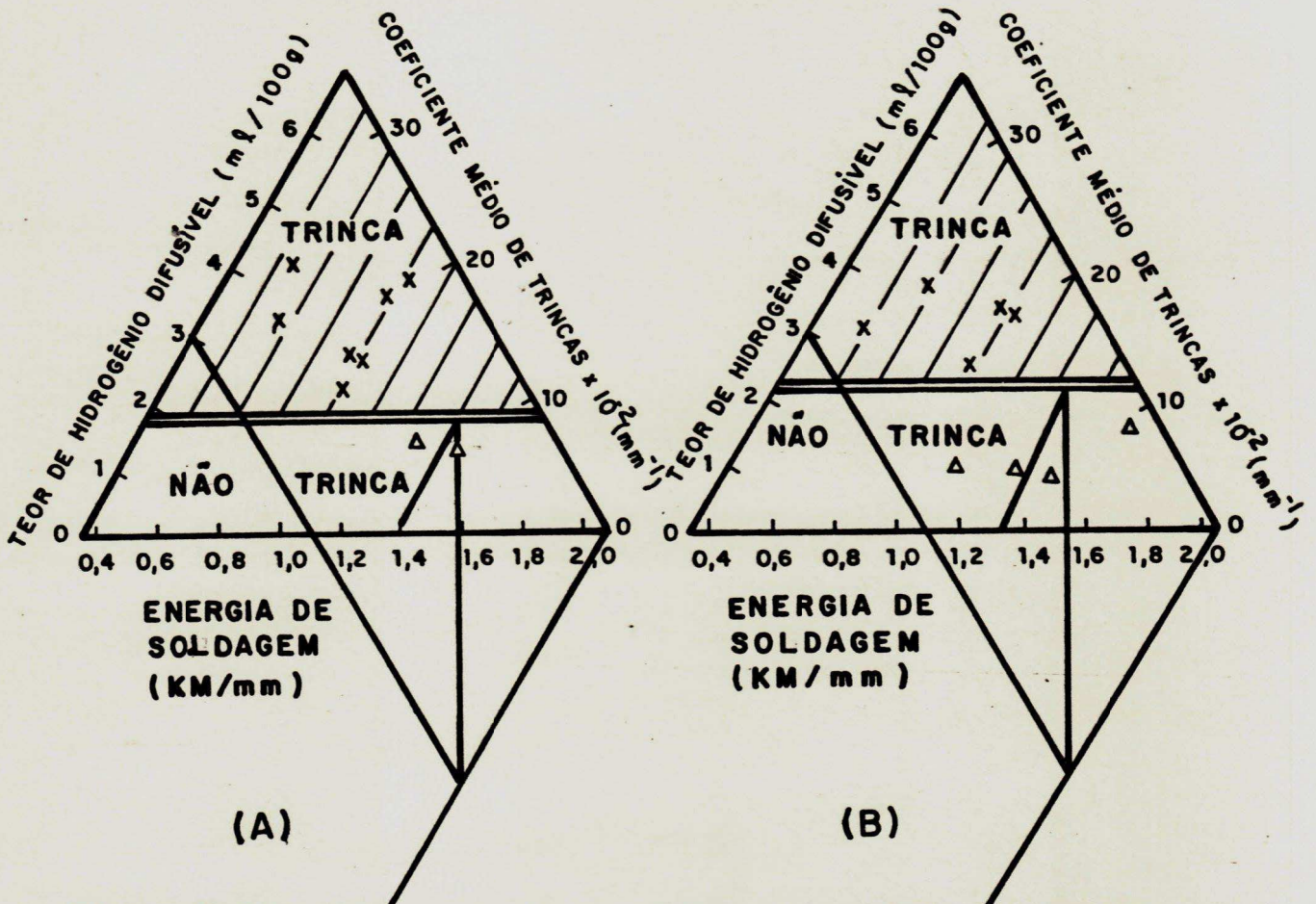


Figura 2.29 - Diagramas de previsão de formação de trincas a frio considerando energia de soldagem e teor de hidrogênio difusível. (A) Eletrodos AWS E 10018, (B) Eletrodos AWS E 13018. /1/

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Absorção de Umidade.

3.1.1 - Materiais e Equipamentos.

Para este trabalho, foram selecionados eletrodos revestidos baixo hidrogênio, do tipo básico, classificação AWS E 7018 G e E 11018 G, com 3,25mm de diâmetro, de fabricação nacional. Os eletrodos foram adquiridos em embalagens metálicas originais, devidamente lacradas. E 7018 é um eletrodo de uso geral, para todas as posições e todos os tipos de junta. São empregados em estruturas rígidas, vasos de pressão, construções navais, aços fundidos, aços não ligados de composição conhecida, etc./20/. E 11018 é de alta resistência mecânica para soldagem de aços de baixa liga com grande resistência à tração. É utilizado em caldeiraria pesada, indústria naval, eixos de motores, recuperação de engrenagens, construções mecânicas e equipamentos em geral /20/. A composição química e propriedades mecânicas do metal depositado por estes eletrodos, fornecidos pelos fabricantes, estão apresentados nas tabelas 3.1 e 3.2.

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 1473 K (1200°C) e precisão de ± 5 graus à 673 K (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 0.60 m de comprimento, temperatura ajustável de 323 a 573 K (50 a 300°C), potência 1.0 kW.
- cochicho de PVC, de fabricação própria, revestido internamente com folha de alumínio e protegido com sílica-gel contra umidade;
- cochicho de PVC, de fabricação própria, revestido internamente com folha de alumínio e isolado termicamente com lã de quartzo.

As figuras 3.1 e 3.2 mostram os cochichos construídos.

Para verificação do nível de absorção de umidade em câmara climatizada, foram utilizados os mesmos equipamentos acima citados além de uma câmara climatizada POWER-D-MATIC 60, fabricada pela BLUE M - Electric Company - Illinois - USA, mostrada na figura 3.3. A limitação de suas faixas de temperatura e umidade relativa dependem das condições ambientais locais. A temperatura tem sua faixa de atuação de 285 K (12°C) acima da temperatura ambiente, até 366 K (93°C). Por sua vez, os níveis de umidade relativa estão sujeitos à temperatura de trabalho da máquina começando com 40% à uma temperatura mínima de 353 K (80°C), indo até 95% com um temperatura mínima de 308 K (35°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

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 673 K (400°C) por 2 horas;

- d - retirada do forno de ressecagem e imediata transferência para estufa à 423 K (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 eletrodo, submetidos à câmara climatizada, nas seguintes condições:

- 313 K (40°C) e 80% de umidade relativa
- 323 K (50°C) e 80% de umidade relativa
- 333 K (60°C) e 80% de umidade relativa
- 333 K (60°C) e 60% de umidade relativa
- 333 K (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 à anterior até a etapa d, e em seguida foram realizadas as etapas:

- e - colocação dos eletrodos na câmara climatizada já em estado estacionário nas condições desejadas de temperatura e umidade relativa. Foram colocadas 12 unidades para se obter pelo menos dois pontos no gráfico, para cada intervalo de verificação selecionado;
- f - 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 expostos 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 e mostrado na figura 3.1, objetivando manter inalterada a umidade do eletrodo;
- 2 - o transporte dos eletrodos do forno de ressecagem até a estufa, e desta, após o resfriamento, até a câmara climatizada foi feita em "cochicho" descrito em 3.1.1 e mostrado na figura 3.2, objetivando manter inalterada a umidade do eletrodo;
- 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 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;

- 6 - os eletrodos foram introduzidos na câmara climatizada, a uma temperatura de 313 K (40°C), para se evitar condensação de água na superfície dos revestimentos /21/. Isto certamente ocorreria, caso fossem introduzidos "frios", ou seja, a temperatura ambiente (296 K/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 adsorção. 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;

- 7 - para cada condição foram ensaiados dois eletrodos para se obter uma média que proporcionasse maior confiabilidade aos resultados obtidos;

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

9 - nos ensaios em câmara climatizada, cada eletrodo após pesagem na condição de "exposto", foi descartado. Isso porque, se houvesse um reaproveitamento desses eletrodos, ter-se-ia amostras com históricos diferentes.

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 um 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 7018 G e E 11018 G, iguais aos utilizados na avaliação de absorção de umidade. A composição química e propriedades mecânicas do metal depositado e metal de base, segundo os fabricantes, estão apresentados nas tabelas 3.1 e 3.2. Na prática, o eletrodo E 11018, não é muito aplicado na soldagem do aço em estudo, porém, foi aqui utilizado para avaliação da susceptibilidade de trincas a frio em 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 0.35 m, temperatura máxima de 1473 K (1200°C) e precisão de ± 5 graus à 673 K (400°C), potência 2.5 kW.
- estufa fabricada pela TERMOSOLDA LTDA, com câmara cilíndrica de 0.30 m de diâmetro e 1.20 m de comprimento, temperatura ajustável de 323 a 573 K (50 a 300°C), potência 1.0 kW.
- balança eletro-mecânica SARTORIS 2474 com precisão de 0,01mg.
- registrador gráfico potenciométrico, marca ECB, modelo RB 101, com as seguintes especificações técnicas:
 tempo de resposta: < 1 seg. para deflexão total.
 faixas de medição para CC: (1;2;3;10;20; 50;100;200;500 mV; 1 e 2 V)
 precisão do divisor: ± 0.1 %
 linearidade: ± 0.1 %
 sensibilidade: ± 0.1 % da faixa selecionada
 velocidade de 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, de fabricação própria, revestido internamente com folha de alumínio e protegido com sílica-gel.
- cochicho de PVC, de fabricação própria, revestido internamente com folha de alumínio e isolado termicamente com lã de quartzo.

3.2.2 - Métodos.

O corte das chapas para preparação dos corpos de prova TEKKEN foi realizado com máquina oxi-acetilênica de corte (tartaruga) e serra eletro-mecânica, seguindo a padronização das medidas mostradas na figura 2.22. O chanfro em Y simétrico foi feito com plaina limadora. Para realização do chanfro em duplo V, destinado à aplicação da solda de restrição, construiu-se o dispositivo mostrado na figura 3.4. Trata-se de uma mesa sobre a qual deslisa um plano inclinado com o mesmo ângulo dos chanfros das peças a serem usinadas. Tendo as peças presas a esse plano (duas de cada vez), o conjunto avança automaticamente em direção a um esmeril de bancada pela ação de um peso calibrado. Para regular a pressão das peças contra o rebolo, empregou-se uma mola, cuja tensão é controlado pelo avanço ou recuo de um parafuso. A própria vibração que o esmeril transmite à mesa, ao girar, concorre para a movimentação do conjunto, que está sendo tracionado pelo peso e pela mola.

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 as placas, por ocasião da solda de restrição, projetou-se um gabarito formado por duas peças metálicas e dois parafusos com porca, presos a uma delas. O mesmo é mostrado na figura 3.5. A solda de restrição foi realizada com eletrodos de classificação AWS E 7018 ressecados a 673 K (400°) por 2 horas.

Após os preparativos, os corpos de prova foram desengraxados com solvente e submetidos à solda de teste. Para isto 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 para se conseguir uma menor velocidade para 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 por 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 3.6 (a) e um exemplo de medição com registrador gráfico potenciométrico, é mostrado na figura 3.6 (b). O aporte

de calor foi calculado através da fórmula que segue:

$$H_i = f \frac{V I}{v} \cdot 10^{-3}$$

Sendo: H_i - aporte de calor em kJ/mm

V - tensão elétrica em volts

I - corrente elétrica em ampéres

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) /18/ 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 2.24. 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 área fundida.

Para o cálculo do CMT, desenhou-se em papel milimetrado transparente o contorno da área fundida de cada seção que se obteve com o corte transversal do cordão de solda. Para avaliação dessas áreas aplicou-se o método planimétrico ou de Jefferies /22/23/. Trata-se de um método utilizado em metalografia quantitativa para determinar a quantidade de grãos por unidade de área. No presente caso o tamanho da área é dado pela quantidade de quadrinhos (milímetros quadrados) existentes no interior do contorno, cuja área se deseja calcular, mais metade dos quadrinhos interceptados por este mesmo contorno. A figura 3.7 ilustra um exemplo de utilização do método.

O comprimento da trinca foi obtido com o auxílio de uma linha de comprimento conhecido onde uma das extremidades foi colada a 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 2.3.5, calculou-se todos os CMT.

3.3 - Análise Metalográfica

3.3.1 - Materiais e Equipamentos

Para análise qualitativa da microestrutura do metal de solda, foram selecionadas amostras trincadas e não trincadas, soldadas com eletrodos E 11018 com baixo, médio e alto teor de umidade absorvida e com alto, médio e baixo aporte de calor. A seção do metal de solda utilizada para este ensaio metalográfico foi a central (seção g da figura 2.25) dos corpos de prova utilizados na determinação do Coeficiente Médio de Trincas (ver 3.2.2).

Além dos equipamentos utilizados no corte do corpo de prova, já descrito 3.2.1, foram utilizados os equipamentos convencionais de preparo de amostras para análise metalográfica, assim como um microscópio ótico marca OLIMPUS, modelo PME, com câmara fotográfica de 35 mm.

3.2.2 - Métodos

As amostras foram embutidas a frio, utilizando-se para isto resina acrílica. O lixamento foi feito em lixadeira motorizada em lixa d'água obedecendo a seguinte sequência: nº 180, 240, 320, 500 e 600. O polimento foi realizado com polítriz motorizada, utilizando-se como abrasivo uma sequência de soluções de alumina de 1; 0.3 e 0.06 microns. Sem ataque químico, as amostras foram analisadas em microscópio para verificação da presença de possíveis inclusões, escórias, porosidades, etc. Em seguida foram atacadas, por imersão, durante 5 segundos, em reagente químico (Nital a 2%), examinadas micrograficamente e fotografadas.

TABELAS E FIGURAS DO
CAPÍTULO - 3

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

	C	S	P	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	V
METAL DE BASE	0.250	0.006	0.020	0.200	0.920				
AWS E 11018 G	0.07	-	-	0.30	1.50	0.40	1.80	0.35	0.10
AWS E 7018 G	0.07	-	-	0.50	1.50				

NOTA - As análises foram fornecidas pelos fabricantes /20/ /25/.

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

	METAL DE ADIÇÃO	METAL DE BASE
CLASSIFICAÇÃO (AWS/ASTM)	E 11018 G E 7018 G	A 516 GR-65
DIÂMETRO/ESPESSURA - (mm)	3.25 3.25	20.64
COMPRIMENTO (mm)	350 350	-
AMPERAGEM RECOMENDADA (A)	100/150 110/150	-
LIMITE DE RESISTÊNCIA (N/mm ²)	> 760 550/590	450/585
ALONGAMENTO (% L = 5 D)	> 20 30	19
LIMITE DE ESCOAMENTO (N/mm ²)	- 451/490	240
RESILIÊNCIA (chv - 5)	- 120(-20°C)	-

NOTA - Dados fornecidos pelos fabricantes /20/ /25/.

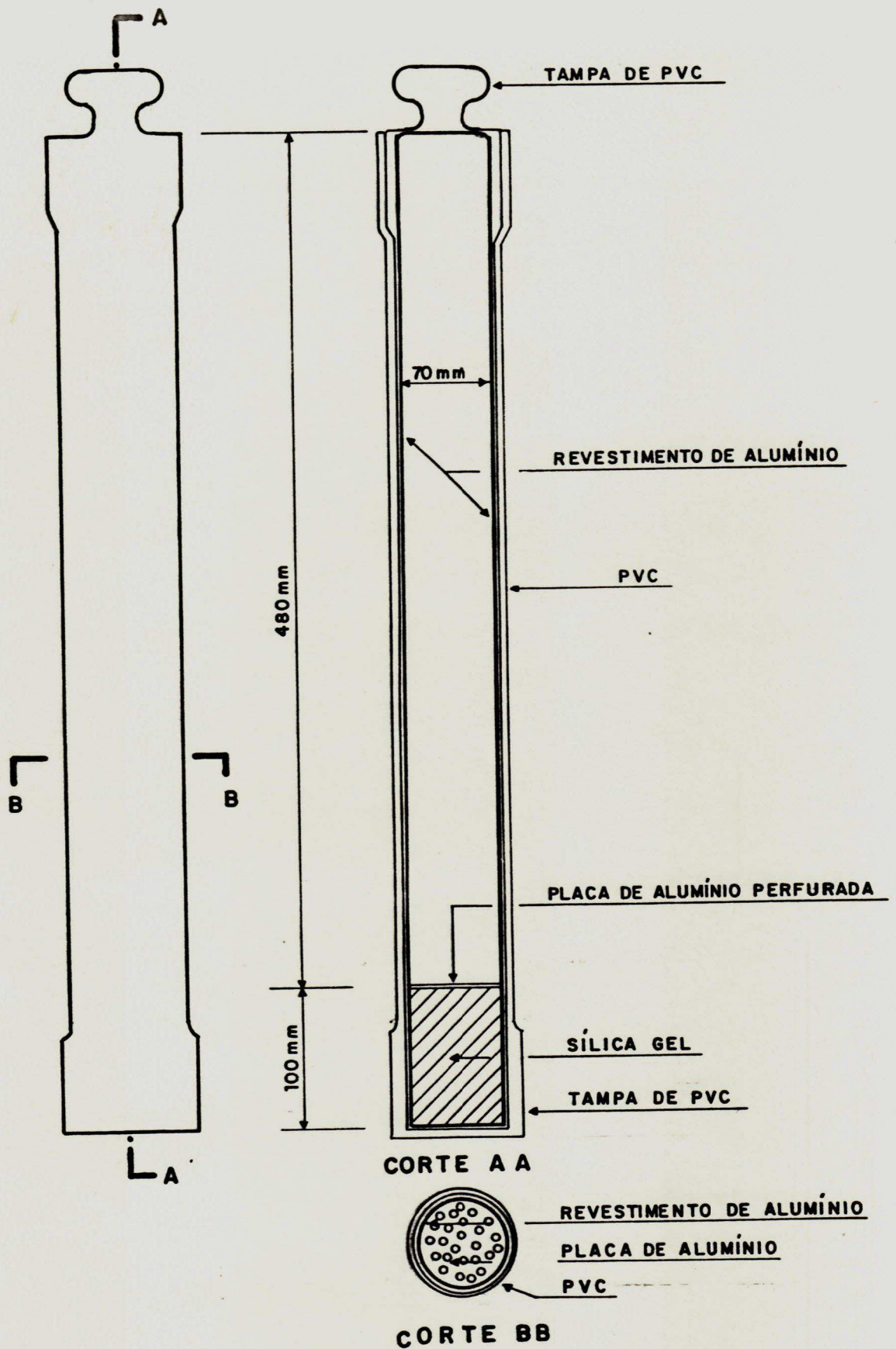


Figura 3.1 - Cochicho de PVC com sílica-gel para proteção dos eletrodos contra umidade

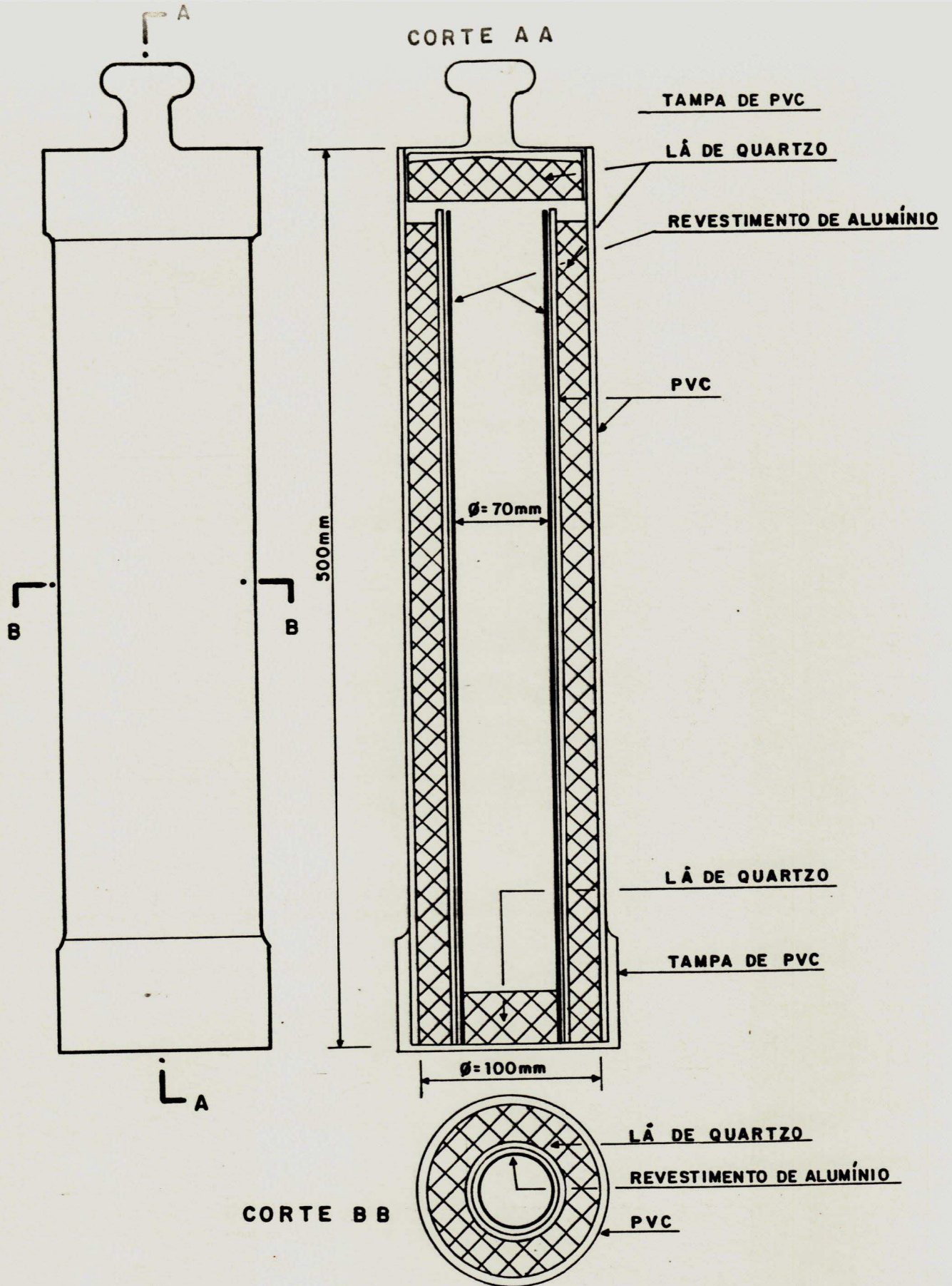


Figura 3.2 - Cochicho de PVC com isolamento térmico

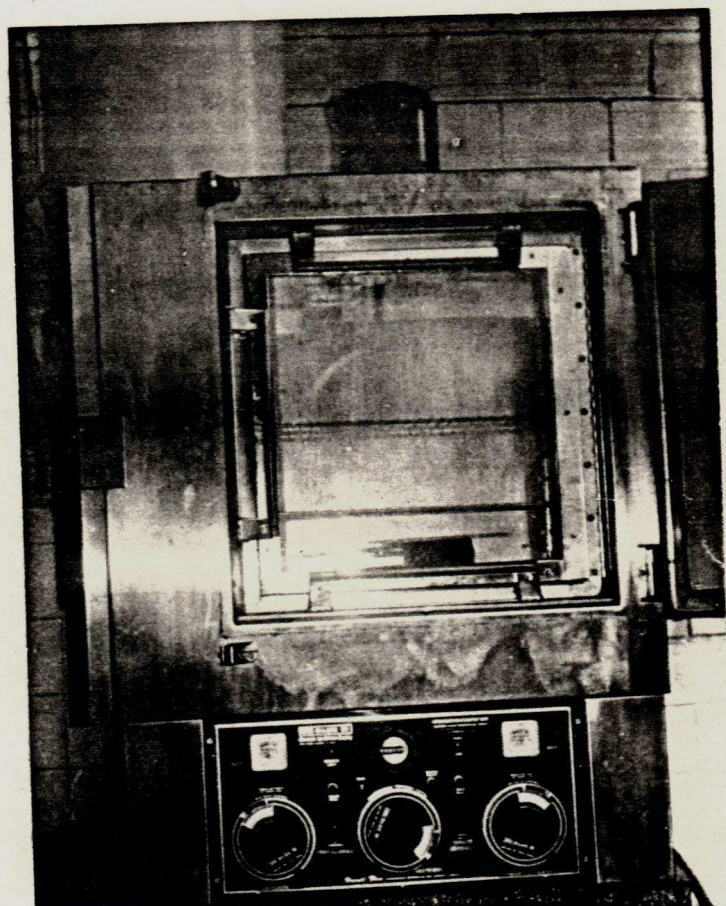


Figura 3.3 - Câmara climatizada POWER - O - MATIC 60

1 - ESMERIL

2 - CORPO DE PROVA

3 - SUPORTE P/ PRENDER
CORPO DE PROVA

4 - PARAFUSO C/ BORBOLETA

5 - APOIO P/ CORPO DE PROVA

6 - PLANO INCLINADO

7 - PEÇA DE MADEIRA

9 - MESA

10 - SUPORTE DE MADEIRA

11 - PESO CALBRADO P/ ACIONA -
MENTO DO CONJUNTO.

12/13 - PARAFUSO E MOLA P/ AJUSTAR A
PRESSÃO DO CORPO DE PROVA
CONTRA O ESMERIL.

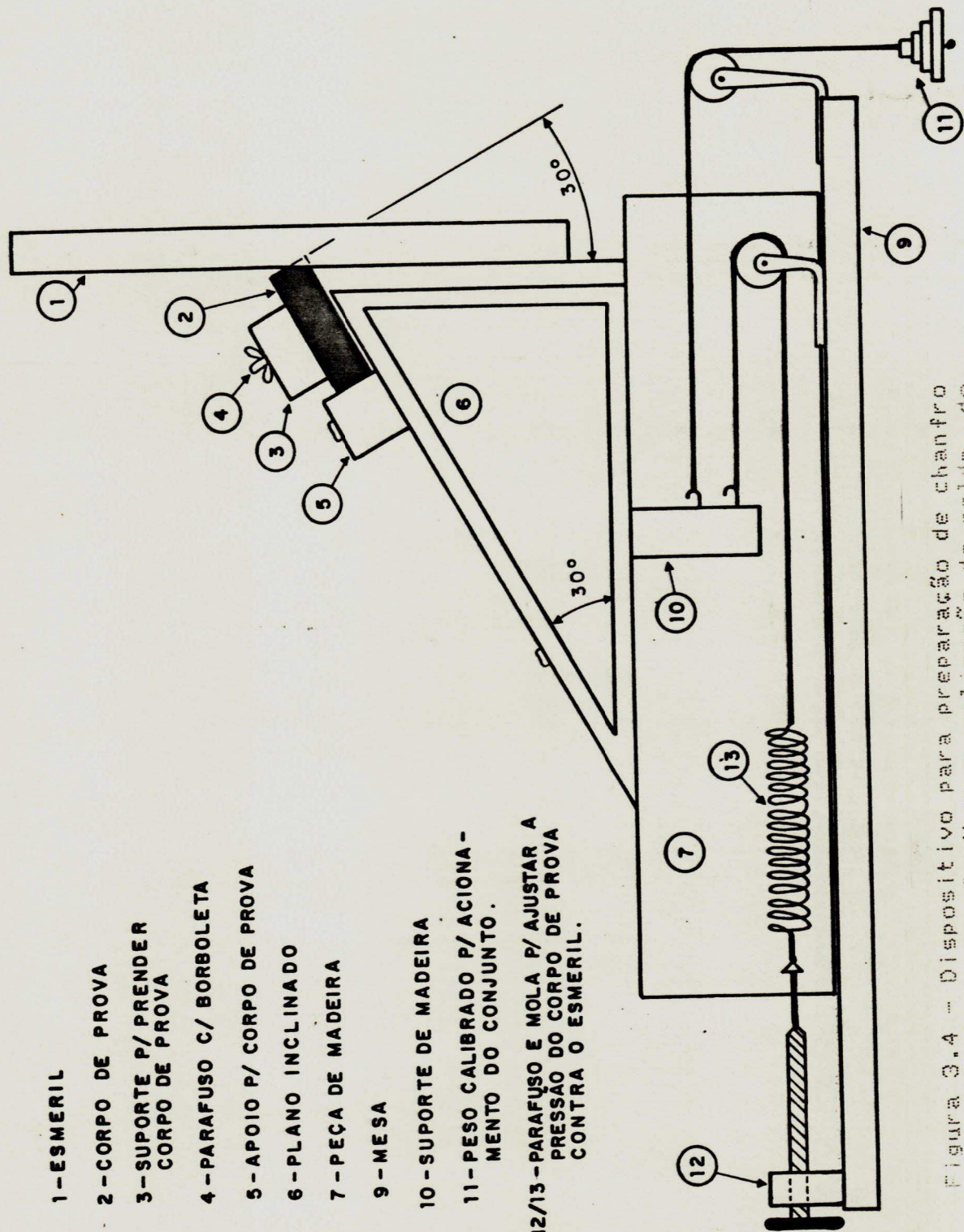


Figura 3.4 - Dispositivo para preparação de chanfro em duplo V para aplicação de solda de restrição.

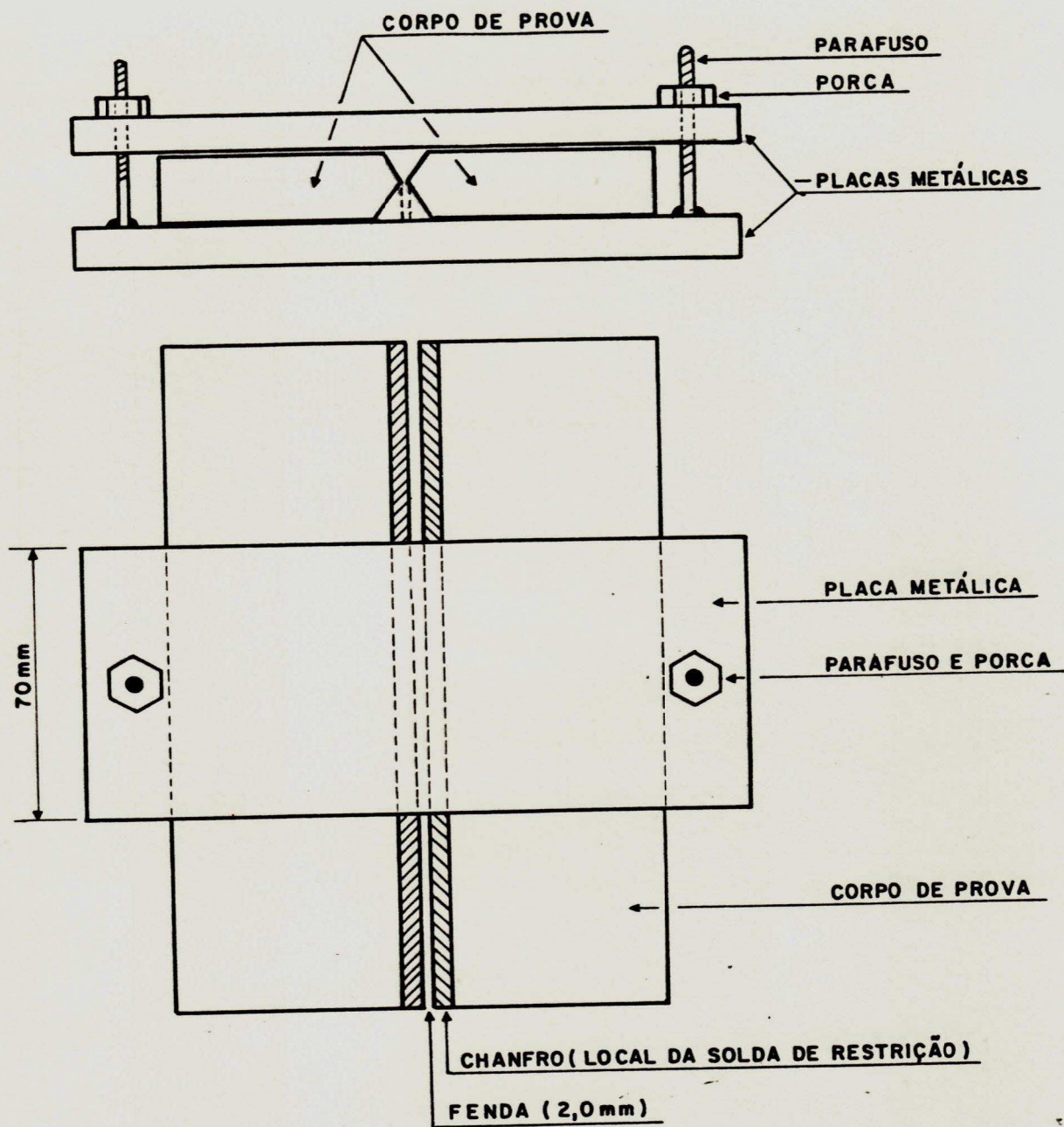


Figura 3.5 - Gabarito para nivelamento do corpo de prova durante a aplicação da solda de restrição.

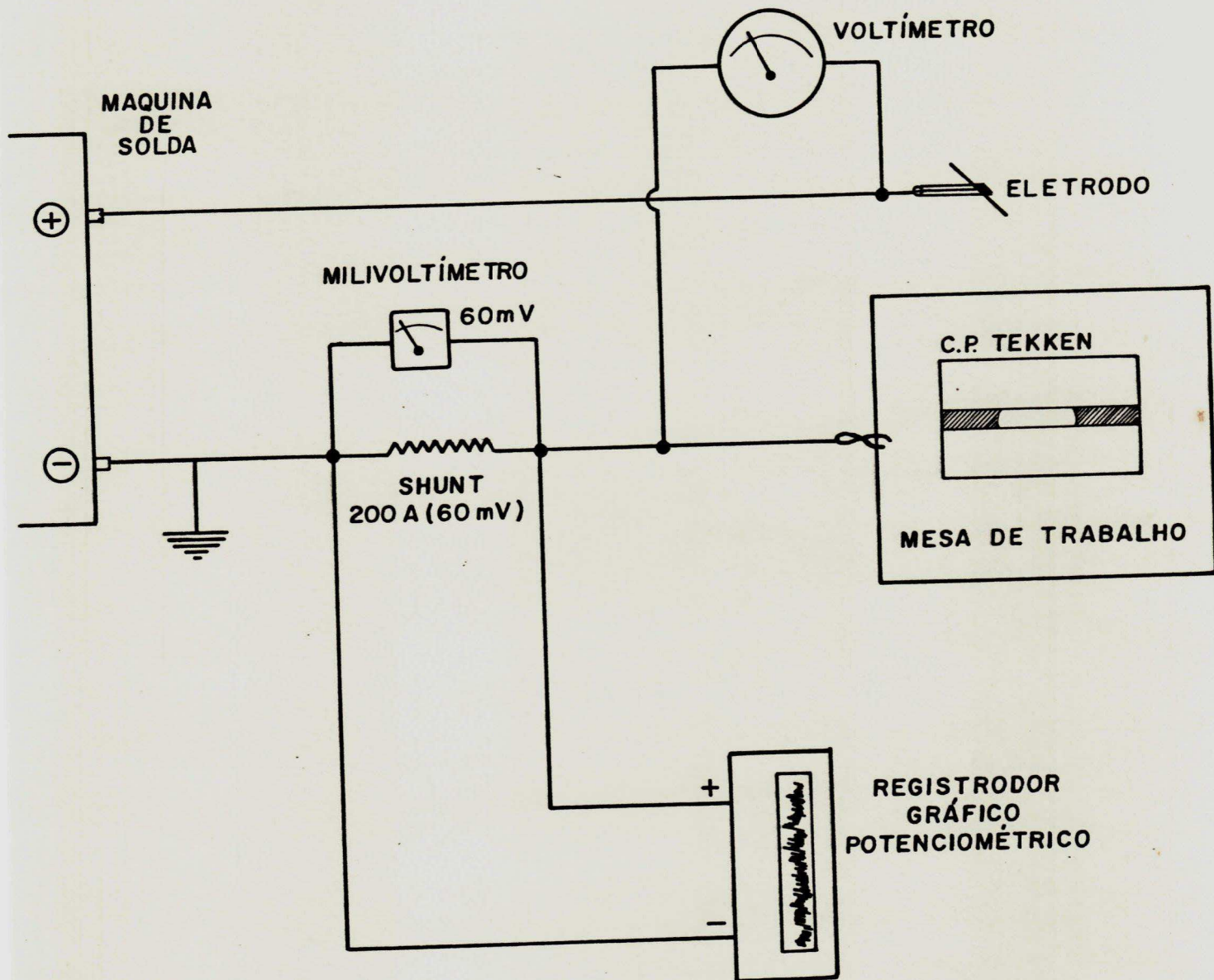


Figura 3.6 (A) - Equipamento para solda a arco alétrico - Esquema para cálculo da corrente, tensão e tempo de soldagem

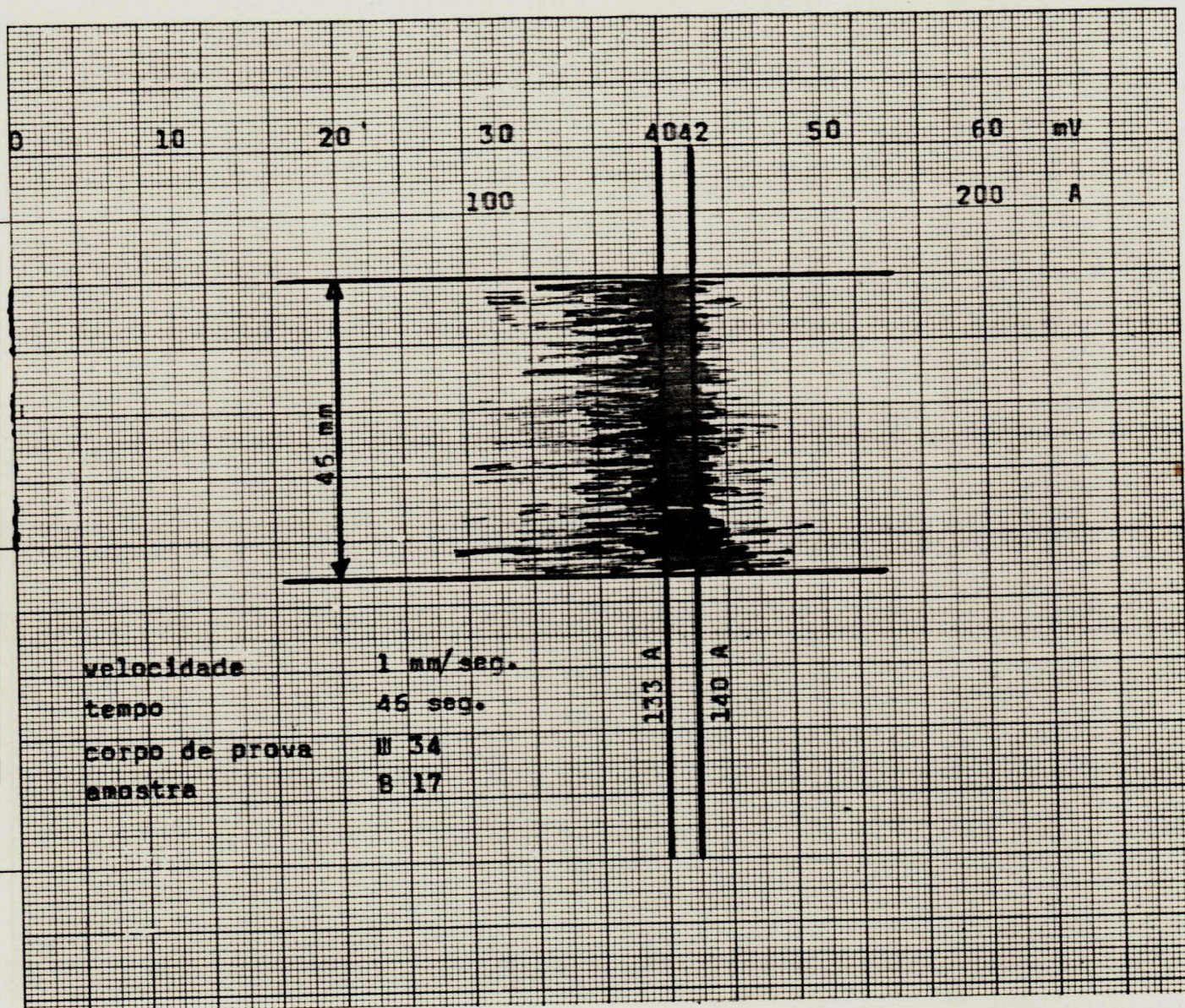


Figura 3.6 (B) - Exemplo de cálculo de amperagem e tempo de soldagem utilizando-se aparelho Registrador Gráfico Potenciométrico.

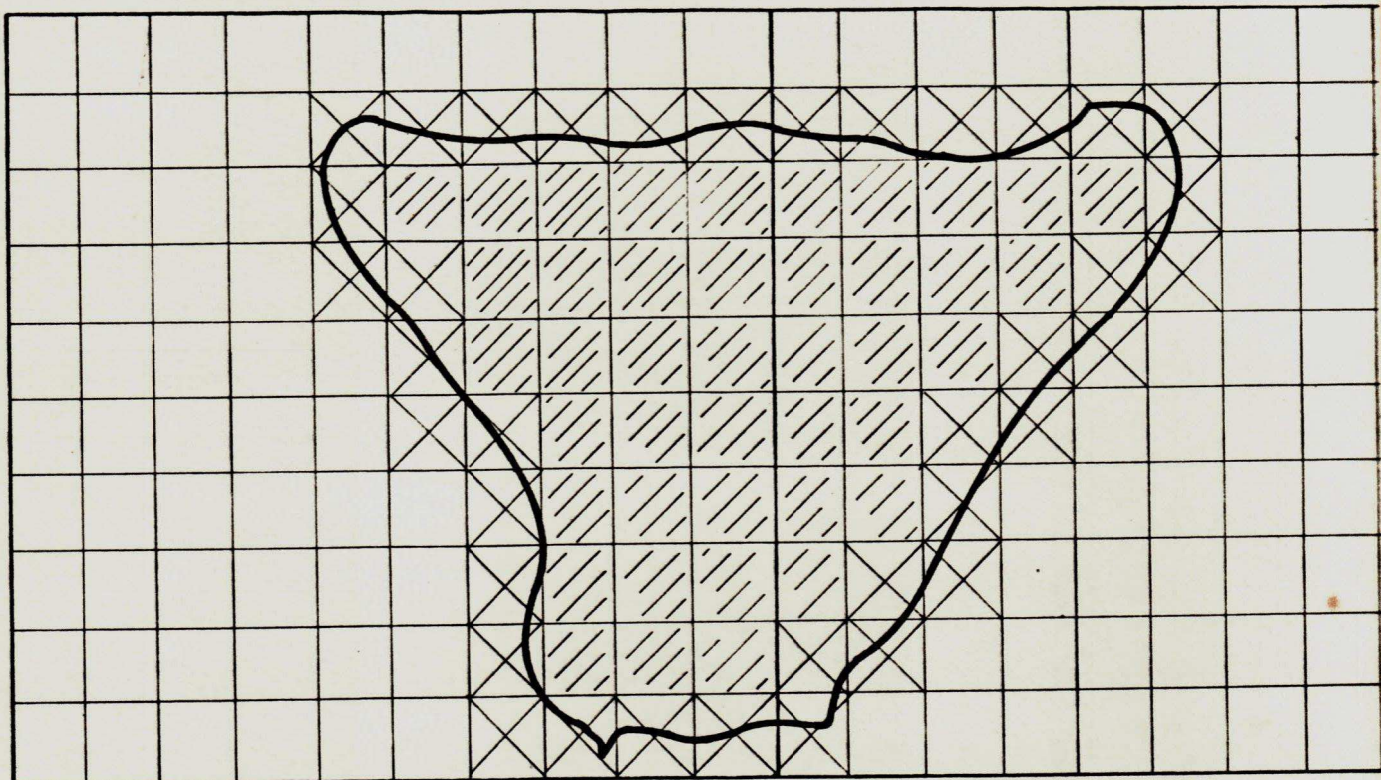


Figura 3.7 - Exemplo de medição de área pelo método planimétrico ou de Jeffreys /22//23/.

$$neq = \frac{nc}{2} + ni$$

neq - quantidade de áreas equivalentes dentro da fronteira.
nc - áreas interceptadas.
ni - áreas internas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Absorção de umidade

Absorção de umidade por exposição do ar livre. A figura 4.1 mostra os resultados dos ensaios realizados com eletrodos AWS E 7018 e E 11018 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 298 K (21 a 25°C). Os valores médios para o período foram de 86% de umidade relativa e 296 K (23°C) de temperatura, estando estes valores coerentes com os da tabela 4.1. Esta tabela retrata as condições meteorológicas do município de Campina Grande, para os dez últimos anos, levantadas pelo Centro Nacional de Pesquisas do Algodão - CNPA /24/, cujo nível médio de temperatura foi de 296 K (23°C) e o de umidade relativa 78%. Comparando-se esta média com as condições impostas pela norma AWS A5.5 - 81, para armazenamento de eletrodos básicos em ambiente normal 303 ± 10 K ($30 \pm 10^\circ\text{C}$ de temperatura e 50% de umidade relativa), constata-se uma grande diferença entre a realidade regional e os valores normalizados.

Para os dois eletrodos estudados observou-se um aumento na umidade absorvida com o tempo de exposição. Após o trigéssimo 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 absorvida por ambos os eletrodos. Com o retorno da umidade relativa a níveis normais, um decréscimo na umidade absorvida também foi observado, sendo porém, a níveis superiores àqueles que vinham sendo observados antes dos picos. Essa rápida absorção, seguida de uma também rápida evaporação da umidade, indicam certamente tratar-se de uma água absorvida por higroscopicidade. A porção de umidade absorvida que se transforma em água cristalizada, aumentando com o tempo, ajuda a manter as curvas em ascensão até a saturação /6/.

Neste trabalho, a verificação da umidade absorvida foi feita pelo teor de umidade relativa, isto é, considerando o eletrodo ressecado como ponto inicial para relacionar todos os outros parâmetros inerentes à pesquisa. Assim sendo, uma comparação direta com os níveis máximos de umidade absoluta especificados pela norma AWS A 5.5 - 81 (0.4% para o

eletrodo E 7018 e 0,15% para o E 11018) e os resultados aqui obtidos, não pode ser feita. JOELE /21/ reportou que o eletrodo AWS E 7018 após ressecagem na condição de 623 K (350°C) por 1 hora, apresenta um resíduo de 0.14 a 0.38% de umidade no revestimento. Assim, no presente trabalho, optou-se por uma ressecagem mais severa, 673 K (400°C) por 2 horas, (norma AWS A 5.5 - 81) /8/, objetivando uma umidade residual mais baixa. Os resultados apresentados na figura 4.1 mostram o quão crítico é a absorção da umidade pelos revestimentos dos eletrodos básicos estudados, os quais atingiram, em condições meteorológicas regionais, níveis de umidade absorvida bem acima dos limites normalizados em apenas poucas horas para o E 11018 e 9 (nove) dias para o E 7018, considerando-se o teor de umidade zero, na condição de ressecado.

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.

Umidade absorvida em câmara climatizada. Os níveis de umidade 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 absorvida pelos eletrodos E 7018 e E 11018, 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 333 K (60°C) para se observar o efeito da umidade relativa sobre a umidade absorvida. Essa temperatura foi fixada em função das características do equipamento utilizado.

Os resultados mostram que, para os eletrodos em testes, a taxa de absorção de umidade tende a aumentar com o aumento da temperatura e/ou umidade relativa de ensaio. Um aumento de 10 graus na temperatura pode até dobrar a taxa de absorção de umidade e um aumento de 20% na umidade relativa pode até triplicar essa taxa.

Para o eletrodo AWS E 7018, a umidade absorvida em torno de 0.2 a 0.3%, após duas horas de exposição, nas condições de 60% de umidade relativa e 333 K (60°C) (figura 4.4), está de acordo com o reportado por JOELE /21/ para eletrodos do mesmo tipo, submetidos às mesmas condições.

Os ensaios correspondentes às figuras 4.2 e 4.3 foram realizados num nível de umidade semelhante à média da região de Campina Grande, ou seja 80%. Nestes ensaios os resultados demonstram que com poucas horas os limites normalizados são atingidos e que este tempo diminui com o aumento da temperatura. Isto representa um alerta para uma prática normal em certas oficinas de soldagem que armazenam eletrodos em

ambientes aquecidos à temperaturas relativamente baixas, sem preocupação com a redução da 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 estoca-los ao ar livre.

Um fato bastante comum, observado pelos soldadores, da má qualidade da junta soldada quando realizada nos dias de umidade relativa alta, por exemplo nos dias chuvosos, pode claramente ser previsto e explicado pelo alto percentual de umidade absorvida pelos revestimentos, quando da variação da umidade relativa do ar observada no 19^a e 27^a dia para eletrodos expostos a ambiente natural e para eletrodos submetidos à câmara climatizada com umidade relativa variando de 60 para 90%.

A diferença nas taxas de absorção de umidade observada entre os dois tipos de eletrodos quando submetidos às mesmas condições de exposição (as condições ambientais e em 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.

4.2 - Trincas a frio causadas por hidrogênio.

A tabela 4.2 apresenta os resultados dos ensaios TEKKEN realizados com o eletrodo AWS E 7018 e a figura 4.6 apresenta estes resultados em gráfico de umidade absorvida versus aporte de calor.

Para o eletrodo E 7018 não se verificou o aparecimento de trincas a frio nas condições de umidade absorvida no presente trabalho (0 a 2.78%) com o aporte de calor variando na faixa de 1.42 a 2.91 kJ/mm, mesmo para condições mais críticas que foi de 2.67% de umidade absorvida e 1.69 kJ/mm de aporte de calor (amostra A 12 da tabela 4.2).

Considerando que o nível máximo de umidade absorvida aplicado no ensaio TEKKEN corresponde ao nível de saturação encontrado na exposição ao ar livre, após 35 dias (2.78%) pode-se concluir que nas condições experimentais utilizadas no presente trabalho não se deve esperar problemas 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.

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os resultados dos ensaios TEKKEN para o eletrodo AWS E 11018, assim como uma avaliação do CMT para as amostras trincadas. A figura 4.7 apresenta esses resultados em gráfico de umidade absorvida versus aporte de calor. A figura 4.8 mostra numa seção transversal de um corpo de prova uma típica trinca a frio causada por hidrogênio observada no presente trabalho.

Para as condições de baixa umidade absorvida, isto é, menor que 0.55% (amostras B1 a B7 da tabela 4.3) trincas foram observadas somente quando o aporte de calor foi menor que 1.85 kJ/mm sendo que o CMT variou na faixa de 0.074 a 0.105 mm⁻¹.

Para as condições de média umidade, isto é, na faixa de 0.90 a 1.80% (amostras B8 a B12 da tabela 4.3) trincas foram observadas já com aporte de calor menor que 2.12 kJ/mm, sendo que o CMT variou na faixa de 0.041 a 0.093 mm⁻¹.

Para as condições de alta umidade absorvida, isto é, de 2.03 a 2.72% (amostras B13 a B17 também da tabela 4.3) trincas foram observadas a partir de um aporte de calor menor que 2.50 kJ/mm com o CMT variando de 0.078 a 0.160 mm⁻¹.

Do acima exposto, verifica-se o aparecimento de trincas a frio em amostras soldadas com eletrodos com alto teor de umidade absorvida 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 absorvida 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 absorvida, 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 térmico de pré ou pós-soldagem) tende a reduzir a taxa de resfriamento reduzindo a possibilidade de formação de constituintes de baixa tenacidade e possibilitando a redução do nível de hidrogênio difusível.

Um valor de aporte de calor mínimo em torno de 2.0 kJ/mm, foi necessário para que trincas a frio fossem evitadas, mesmos para aqueles ensaios realizados com eletrodos ressecados.

4.3 - Exame Metalográfico

O exame metalográfico mostra que a microestrutura varia com o aumento do aporte de calor, passando de uma estrutura predominantemente Bainítica para Ferrita Acicular e para Ferrita

Acicular mais Ferrita Primária, não se verificando entretanto diferenças nas microestruturas quando somente o nível de umidade, no eletrodo, foi alterado. As figuras 4.9 e 4.10 mostram as microestruturas do metal de solda, das amostras B5 e B9 soldadas com aporte de calor de 1.85 e 2.29 kJ/mm respectivamente. Embora ambas microestruturas apresentem Ferrita Acicular, essa microestrutura se apresenta notoriamente mais grossa quando o aporte de calor aumenta. Essa formação de estrutura mais tenaz com aumento do aporte de calor poderia explicar a menor susceptibilidade das amostras assim soldadas à trincas a frio. Naturalmente para o aprofundamento e esclarecimento desta questão, uma acurada análise metalográfica quantitativa seria necessária.

TABELAS E FIGURAS DO
CAPÍTULO - 4

TABELA 4.1 - Dados Meteorológicos do Município de
Campina Grande - Pb - /24/.

ANOS	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988										
MESES	°C	UR(%)	°C	UR(%)	°C	UR(%)	°C	UR(%)	°C	UR(%)										
JANEIRO	23,9	81	23,9	78	23,7	75	23,4	76	24,3	73	24,1	71	24,6	71	24,0	73	24,3	75	25,0	70
FEVEREIRO	24,0	80	23,8	82	23,7	75	23,6	76	24,0	78	24,7	70	24,0	78	23,6	78	24,3	74	25,2	71
MARÇO	24,2	77	23,1	80	23,4	81	23,8	78	24,5	81	25,0	75	23,5	85	23,3	81	24,3	81	24,8	76
ABRIL	23,9	77	23,1	81	22,8	81	24,0	77	23,8	78	23,2	83	-	-	23,3	86	23,5	85	23,9	82
MAIO	22,2	87	22,5	81	22,3	81	22,4	84	22,7	84	22,3	86	22,6	84	22,8	84	23,6	78	22,8	84
JUNHO	20,8	87	21,5	84	21,2	82	21,3	88	21,9	86	21,5	84	21,8	84	21,3	86	22,4	84	22,0	82
JULHO	20,5	83	21,2	77	20,2	79	20,9	86	21,4	84	20,8	85	20,8	86	20,9	85	21,6	84	20,9	85
AGOSTO	21,0	81	21,4	78	21,1	72	20,9	85	21,2	84	21,1	85	21,2	82	21,1	85	22,3	77	20,8	81
SETEMBRO	21,5	84	22,6	74	21,9	71	21,7	74	22,4	78	21,9	80	22,0	77	21,6	83	22,6	74	21,8	75
OUTUBRO	22,9	75	22,8	76	23,2	69	22,5	72	22,6	76	23,1	76	23,1	68	22,7	79	23,5	70	23,2	73
NOVEMBRO	23,2	78	23,4	75	23,4	72	23,2	72	23,4	69	23,4	70	23,5	70	23,2	78	24,4	69	23,8	74
DEZEMBRO	24,0	72	23,6	76	23,7	77	22,8	76	24,1	70	24,4	69	23,8	73	23,7	76	24,6	69	23,8	75
MEDIA	22,7	80	22,7	78	22,6	76	22,5	79	23,0	79	23,0	78	22,8	78	22,6	81	23,4	77	23,2	77

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

TABELA 4.2 - Mapa de ensaios

AMOSTRA	CARACTERÍSTICAS DO ARCO ELÉTRICO					UMIDADE	
	CORRENTE (A)	TENSÃO (V)	TEMPO (seg)	VELOCIDADE (mm/s)	NÍVEL ENERG. (kJ/mm)	ABSORVIDA (%)	C M T mm ⁻¹
A1	115	21	85	0.94	2.57	RESSECADO	0
A2	135	20	67	1.19	2.26	"	0
A3	135	20	50	1.60	1.69	"	0
A4	135	20	50	1.60	1.69	0.23	0
A5	115	21	95	0.84	2.87	0.28	0
A6	135	20	75	1.06	2.54	0.29	0
A7	135	20	42	1.90	1.42	0.71	0
A8	135	20	73	1.09	2.46	1.18	0
A9	135	20	50	1.60	1.69	1.29	0
A10	135	20	79	1.01	2.67	1.37	0
A11	135	20	42	1.90	1.42	1.58	0
A12	135	20	50	1.60	1.69	2.67	0
A13	115	21	96	0.83	2.91	2.69	0
A14	135	20	80	1.00	2.70	2.78	0

Ensaio com eletrodos AWS E 7018

TABELA 4.3 - Mapa de ensaios

AMOSTRA	CARACTERÍSTICAS DO ARCO ELÉTRICO					UMIDADE	
	CORRENTE (A)	TENSÃO (V)	TEMPO (seg)	VELOCIDADE (mm/s)	NÍVEL ENERG. (kJ/mm)	ABSORVIDA (Z)	C M T (mm ⁻¹)
81	135	20	70	1.14	2.36	RESECCADO	0
82	135	20	66	1.21	2.22	"	0
83	135	20	65	1.23	2.19	0.49	0
84	135	20	60	1.35	2.03	RESECCADO	0
85	135	20	55	1.46	1.85	"	0.074
86	135	20	54	1.48	1.82	0.55	0.090
87	135	20	50	1.60	1.69	RESECCADO	0.105
88	135	20	70	1.14	2.36	1.50	0
89	135	20	68	1.18	2.29	0.90	0
810	135	20	63	1.27	2.12	1.29	0.062
811	135	20	60	1.33	2.03	0.97	0.041
812	135	20	60	1.33	2.03	1.80	0.093
813	135	20	77	1.03	2.60	2.20	0
814	135	20	74	1.08	2.50	2.72	0.078
815	135	20	64	1.25	2.16	2.20	0.101
816	135	20	62	1.29	2.09	2.52	0.160
817	135	20	46	1.74	1.55	2.03	0.131

Ensaios com eletrodos AWS E 11018

NOTA - Todas as trincas aconteceram no sentido longitudinal do cordão de solda.

Tabela 4.4 - Mapa para levantamento do CMT (mm^{-1})

AMOSTRA	IDENTIF.	MEDIDAÇÃO POR SEÇÃO								SOMATÓRIO	C M T
		1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª		
B 5	TRINCAS	4.0	3.0	4.5	4.0	5.5	0.0	4.0	4.0	29.0	0.074
	AREAS	48.0	42.0	43.0	43.0	41.5	87.5	43.0	43.0	391.0	
B 6	TRINCAS	5.5	0.0	7.0	5.0	5.5	4.0	0.0	5.5	32.0	0.090
	AREAS	45.0	37.0	44.5	47.0	44.0	36.0	55.0	47.0	355.5	
B 7	TRINCAS	2.0	4.0	3.5	4.5	4.0	5.5	2.5	3.0	29.0	0.105
	AREAS	41.5	31.5	32.5	31.5	31.5	41.5	32.5	32.0	274.5	
B 10	TRINCAS	5.0	5.0	5.0	0.0	3.0	0.0	5.0	5.0	28.0	0.062
	AREAS	49.0	42.0	49.0	49.0	62.0	77.0	62.0	62.0	452.0	
B 11	TRINCAS	5.0	0.0	5.0	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	15.5	0.041
	AREAS	39.0	47.0	36.5	44.0	104.0	37.5	38.0	30.5	376.5	
B 12	TRINCAS	4.0	6.5	4.0	5.5	0.0	4.5	6.5	4.5	35.5	0.093
	AREAS	26.0	55.0	34.0	45.0	78.0	47.0	60.0	35.0	381.0	
B 14	TRINCAS	0.0	5.0	7.5	0.0	7.0	5.0	6.0	6.0	36.5	0.078
	AREAS	49.0	49.0	49.0	102.0	63.0	45.0	46.0	62.0	465.0	
B 15	TRINCAS	0.0	6.5	5.0	4.5	6.0	6.0	0.0	5.5	33.5	0.101
	AREAS	43.0	60.0	34.0	32.0	32.0	43.0	44.0	44.0	332.0	
B 16	TRINCAS	4.0	5.5	5.0	4.0	7.0	11.0	5.5	4.5	46.5	0.160
	AREAS	29.5	33.5	29.5	27.5	44.5	50.0	43.5	33.5	291.5	
B 17	TRINCAS	0.0	4.5	5.0	2.0	4.0	4.0	5.0	6.0	30.5	0.131
	AREAS	32.0	30.0	28.5	26.0	27.0	29.0	28.0	32.0	232.5	

Ensaio com eletrodos AWS E 11018

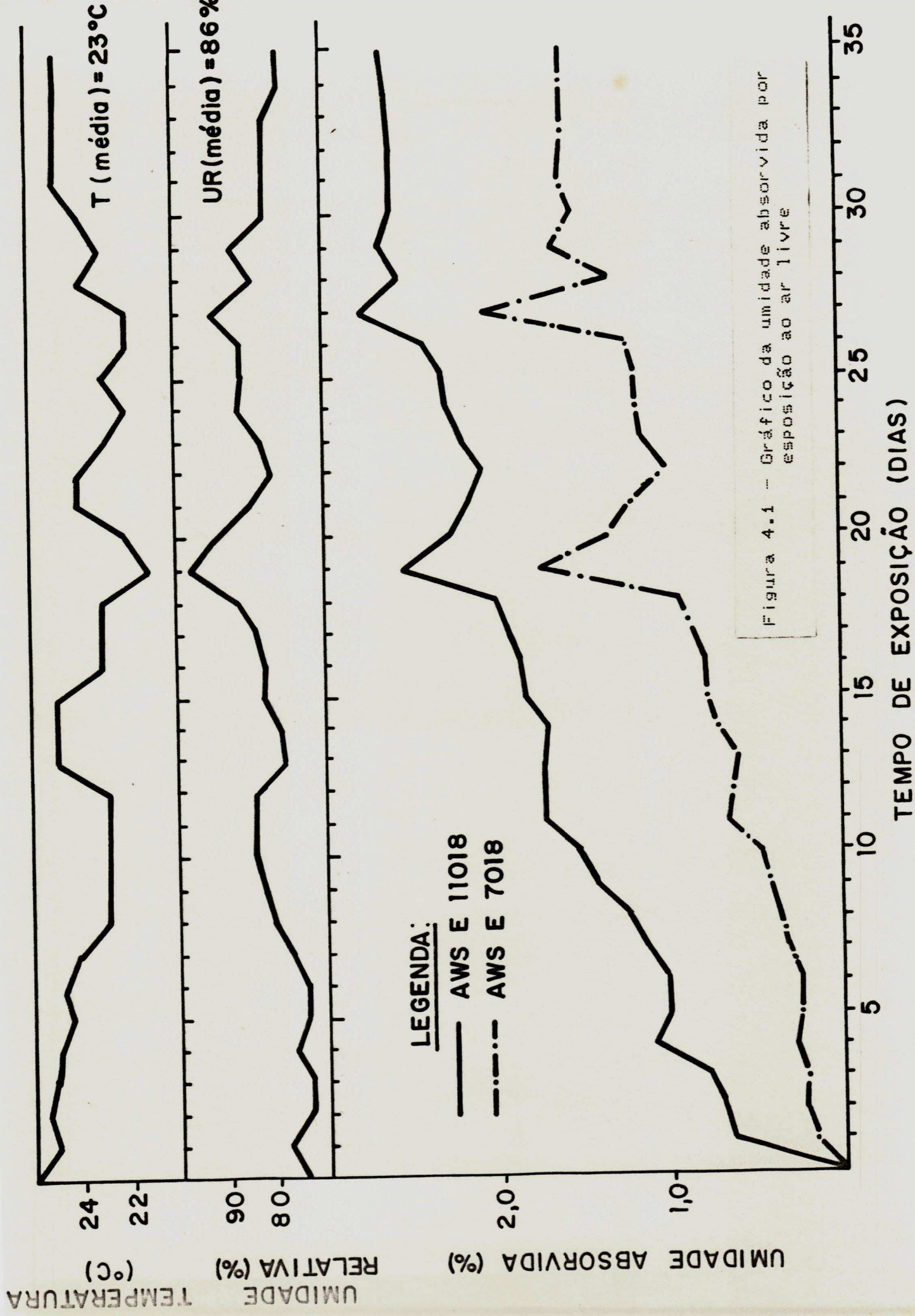


Figura 4.1 - Gráfico da unidade absorvida por exposição ao ar livre

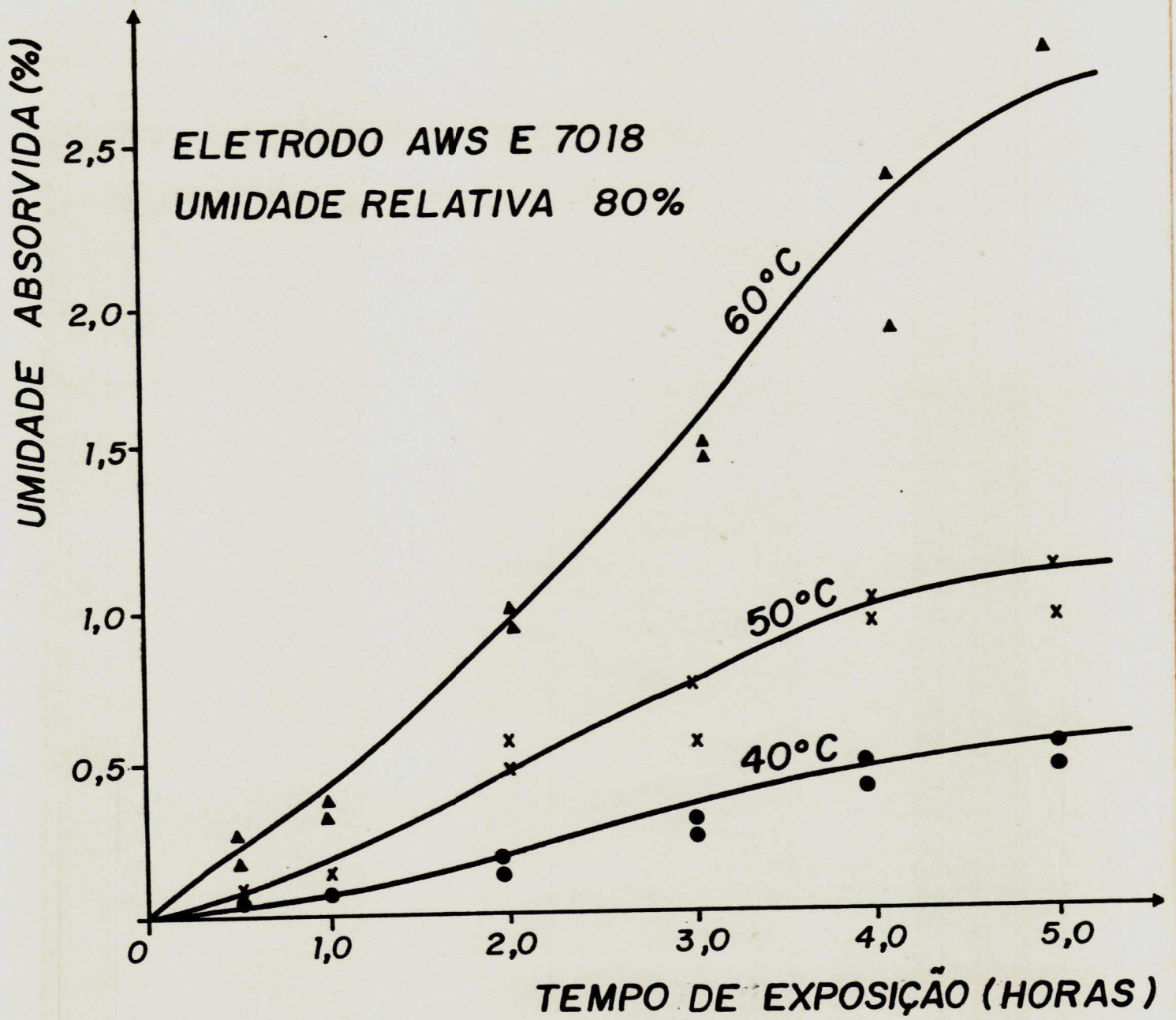


Figura 4.2 - Efeito da temperatura sobre a umidade absorvida.

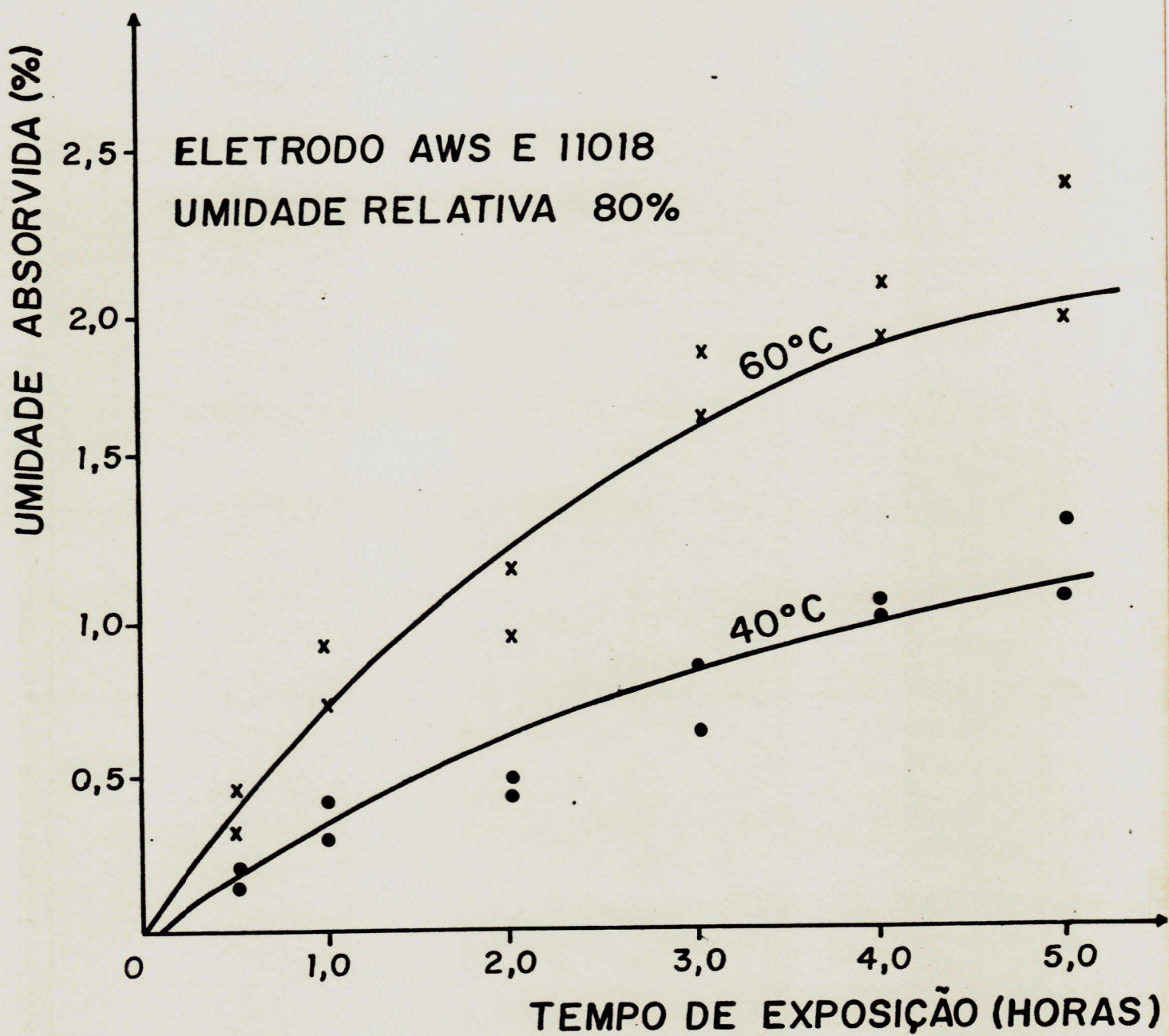


Figura 4.3 - Efeito da temperatura sobre a umidade absorvida.

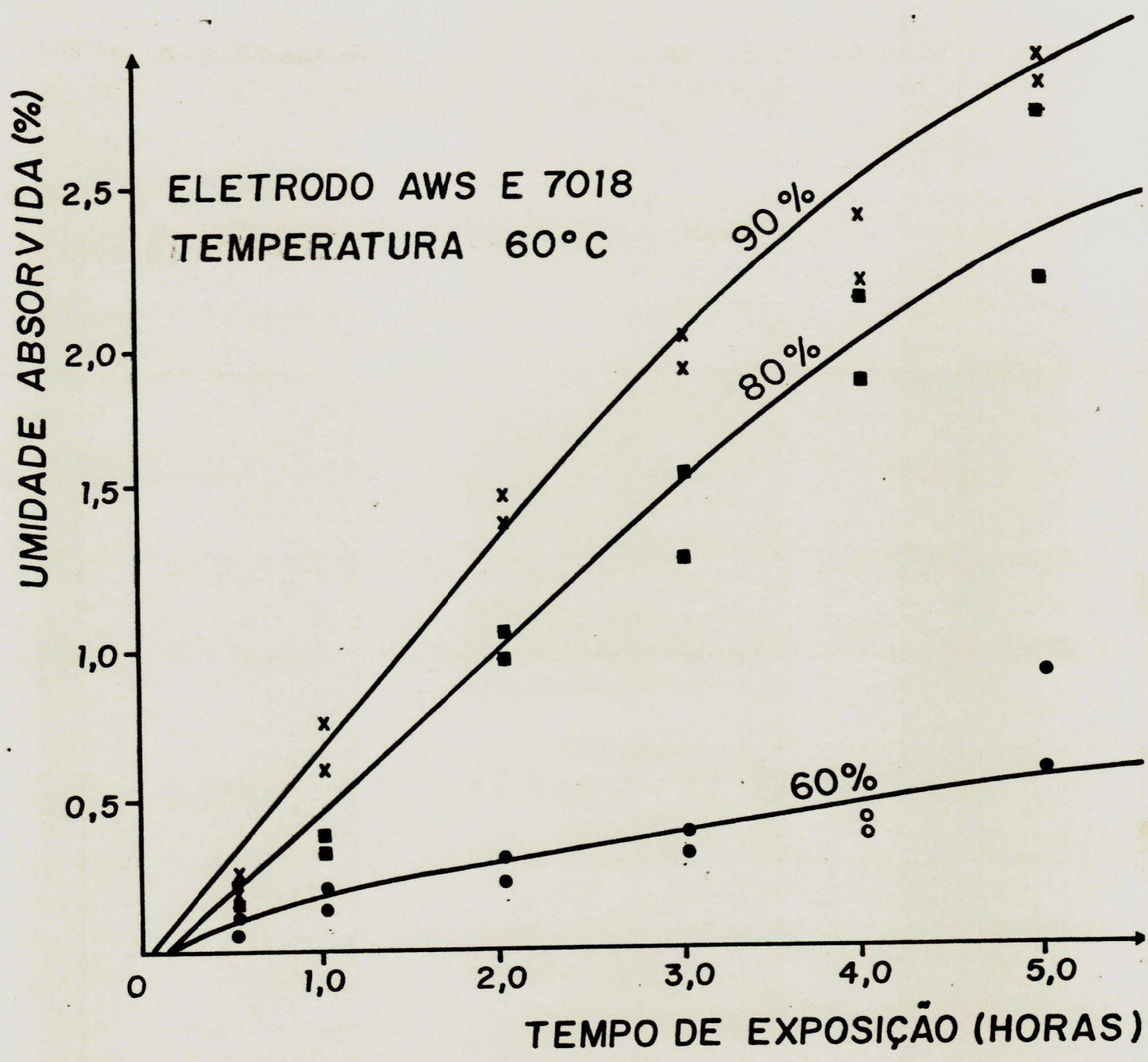


Figura 4.4 - Efeito da umidade relativa sobre a umidade absorvida.

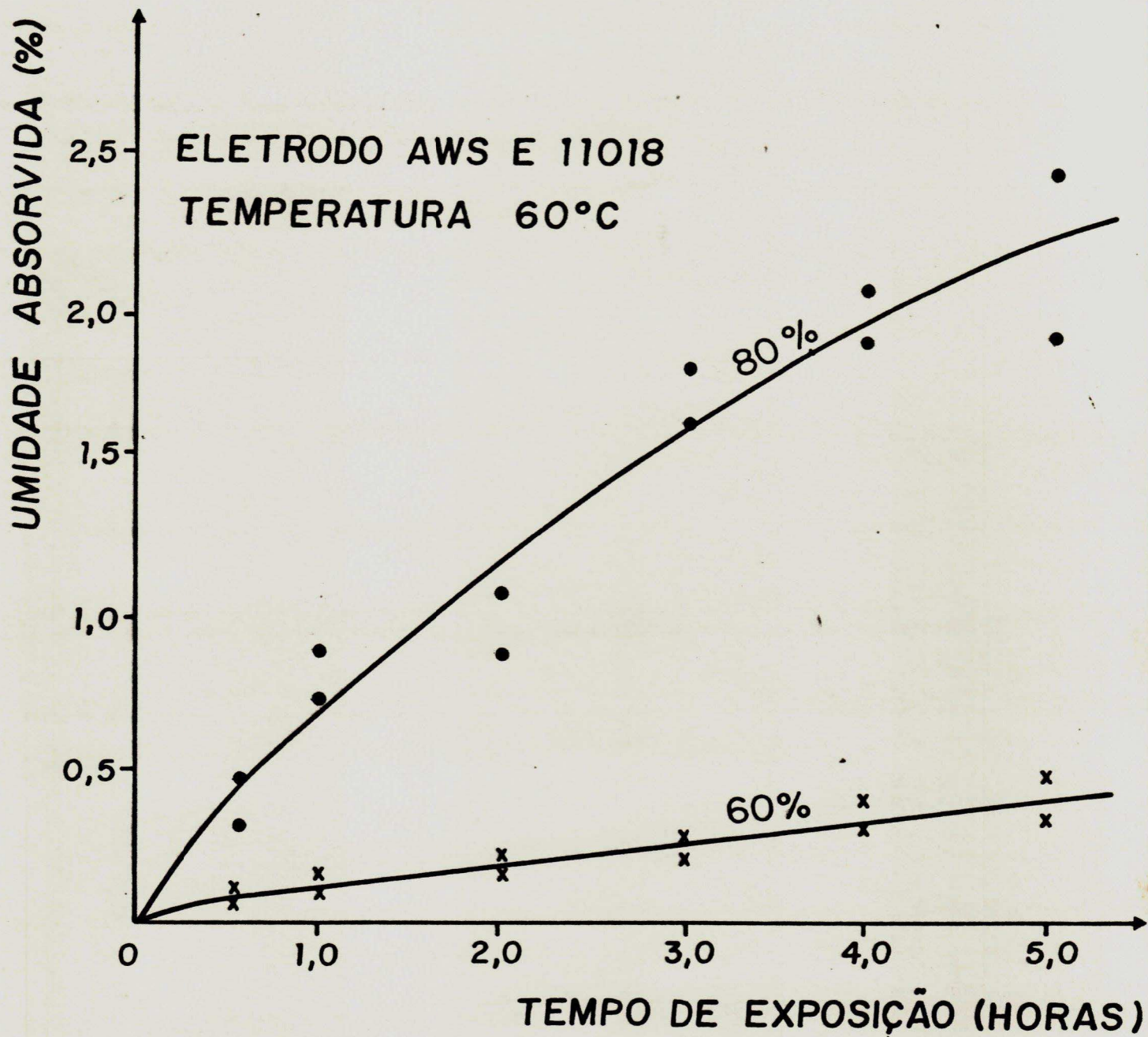


Figura 4.5 - Efeito da umidade relativa sobre a umidade absorvida.

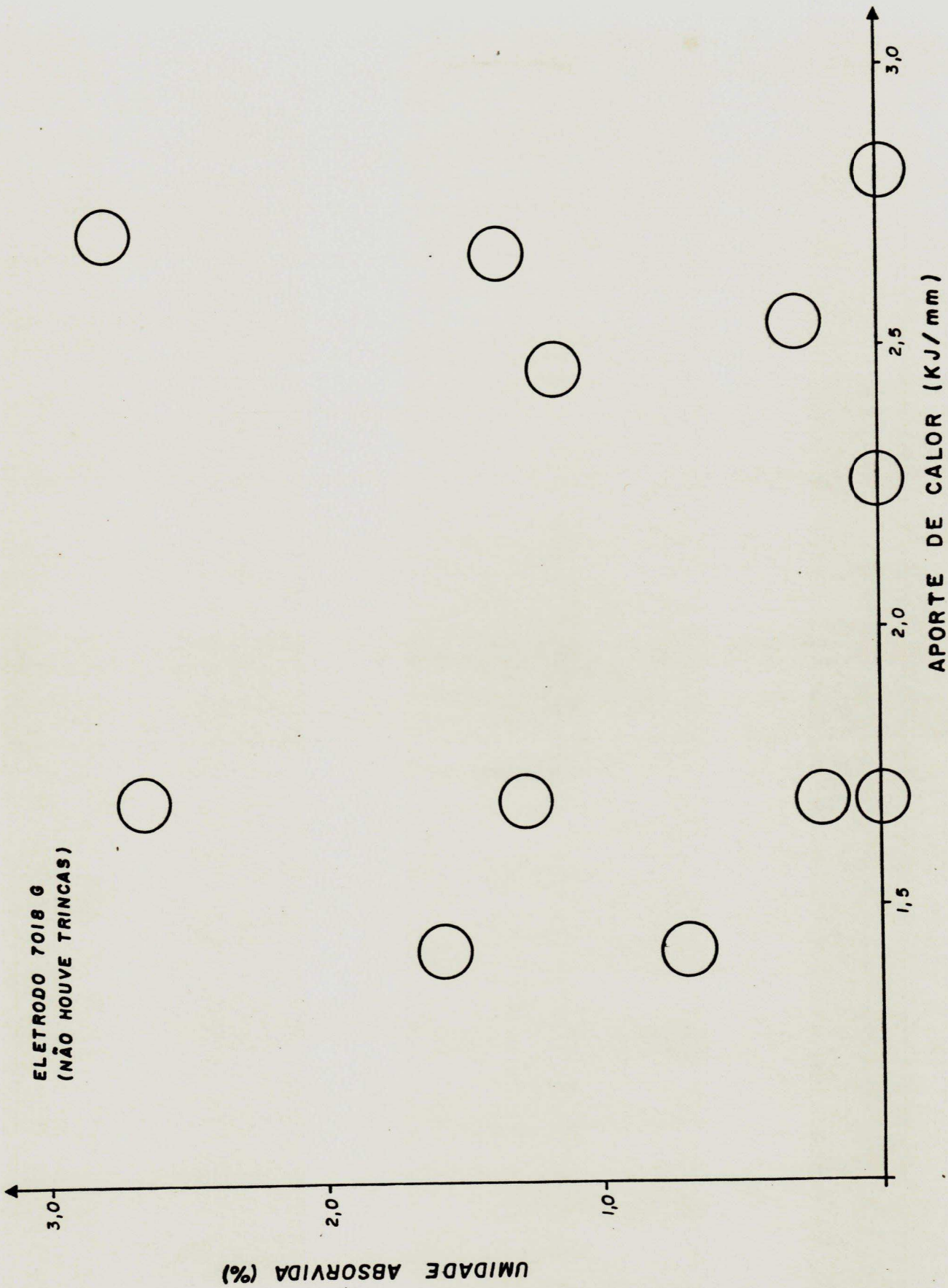


Figura 4.6 - Ensaio TEKKEN - verificação de trincas.

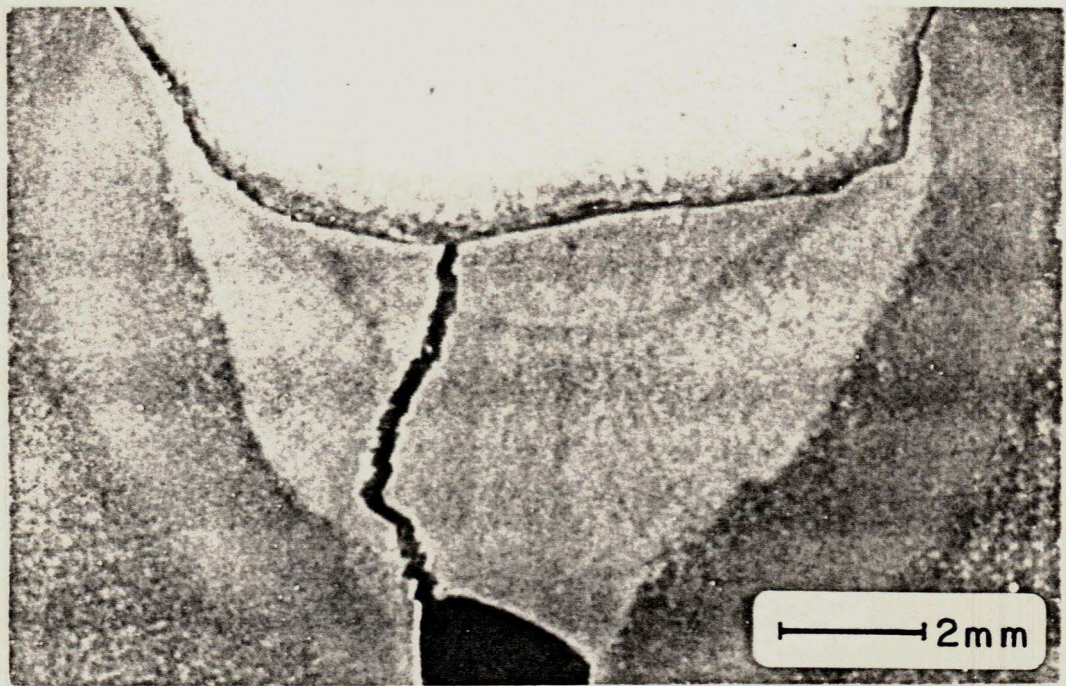


Figura 4.8 - Seção transversal do metal de solda com trinca a frio causada por hidrogênio.

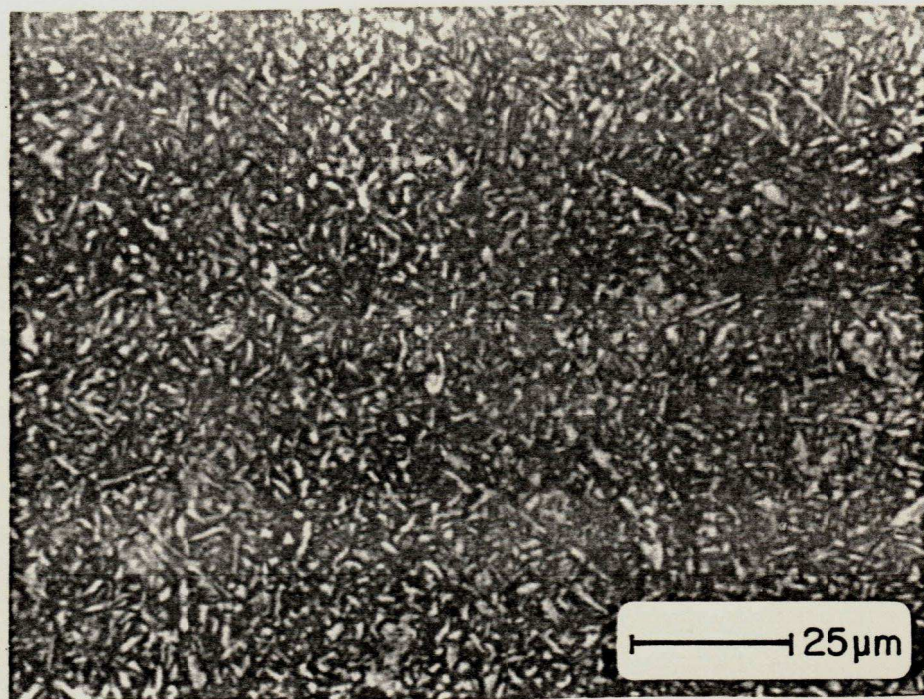


Figura 4.9 - Microestrutura do metal de solda da amostra B 5, soldada com eletrodo AWS E 11018, ressecado e aporte de calor de 1.85 kJ/mm.

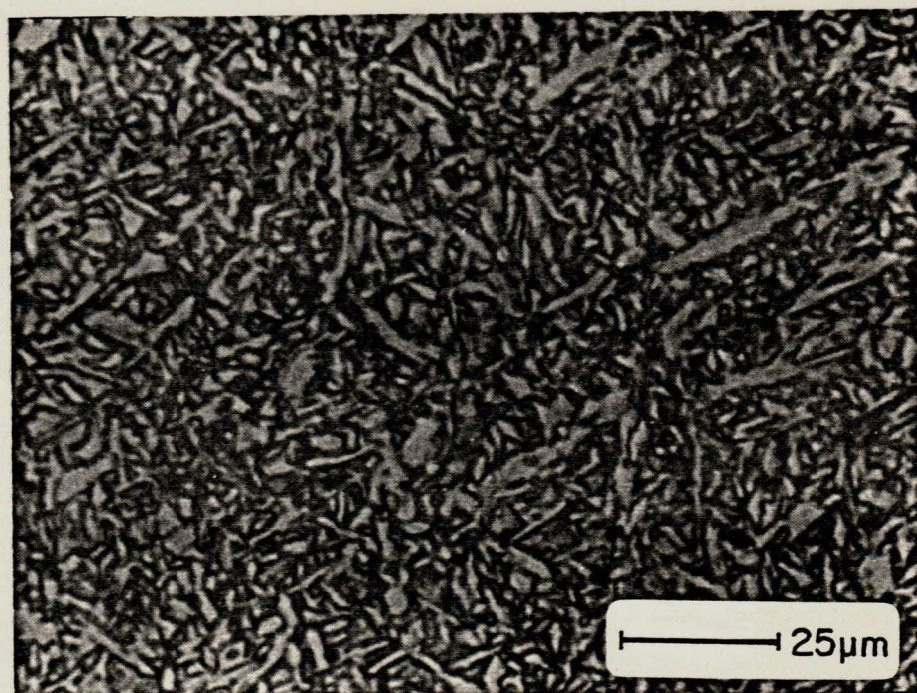


Figura 4.10 - Microestrutura do metal de solda da amostra B 9, soldada com eletrodo AWS E 11018, com umidade absorvida de 0.9% e aporte de calor de 2.29 kJ/mm.

CONCLUSÕES

- Os eletrodos AWS E 7018 e E 11018 absorvem rapidamente umidade quando expostos às condições ambientais com temperatura média de 296K (23°C) e umidade relativa média de 86%, atingindo níveis, à partir da condição de ressecados, de até 2,7% após 35 dias de exposição.

- Se considerarmos o teor de umidade absoluta nula, na condição de ressecado, os limites de umidade máxima normalizados seriam atingidos com exposição às condições ambientais após algumas horas para o eletrodo AWS E 11018 e 9 dias para o E 7018.

- A umidade absorvida pelos revestimentos dos eletrodos estudados aumentam com a temperatura e umidade relativa do ambiente.

- Para níveis de umidade relativa regional, que é de 80%, e temperatura acima de 313 K, (40°C), os limites de umidade máxima, normalizados, seriam atingidos após poucas horas de exposição para ambos eletrodos estudados.

- Não se verificou o aparecimento de trincas a frio no cordão de solda, nos corpos de prova TEKLEN, para o eletrodo AWS E 7018 com umidade absorvida de até 2,78% e aporte de calor variando na faixa de 1,42 a 2,90 kJ/mm.

- Trincas a frio, no cordão de solda dos corpos de prova TEKKEK, para o eletrodo AWS E 11018, foram verificadas quando condições críticas de umidade absorvida e aporte de calor foram utilizadas.
- Um aporte de calor mínimo de 2,0 kJ/mm foi necessário para que trincas a frio fossem evitadas para eletrodos E 11018 ressecados.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- 1 - Determinação de umidade absoluta no revestimento dos eletrodos conforme metodologia apresentada pela norma AWS A5.5 - 81, tendo em vista que neste trabalho, o nível de umidade foi expresso pela umidade absorvida relativa ao eletrodo ressecado.
- 2 - Ensaios de dureza no metal de solda das amostras, procurando relacioná-los ao nível de aporte de calor e à susceptibilidade de trincas a frio.
- 3 - Exame micrográfico no metal de solda das amostras, procurando relacioná-lo ao nível de aporte de calor e à susceptibilidade de trincas a frio..

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ALCANTARA, N.G., "Trincas a Frio Causadas pelo Hidrogênio - Problemas e Soluções". IN: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM DA REGIÃO SUL, 1ª - Porto Alegre - RS - Brasil, 22-26 set 1986, p. 31-50, Anais.
- 2 - ALCANTARA, N.G., "Efeito de Gases na Soldagem de Aços" Capítulo XI do livro "Gases em Metais e Ligas," (a ser editado, aceito em 1986), Brasil, 24 p.
- 3 - GRANJON, H., "Introdução à Metalurgia da Solda" - Publicação da ABM - Associação Brasileira de Metais - Coordenação do Eng. EMÍLIO WAINER - 14ª Edição Ampliada - São Paulo - 1979, 32 p.
- 4 - MELEIRO, J.C., "Soldagem ao Arco com Eletrodos Revestidos" - Publicação da ABM - Associação Brasileira de Metais - Coordenação do Eng. EMÍLIO WAINER - 14ª Edição Ampliada - São Paulo - 1979, 145 p.
- 5 - MACHADO, I. G., "Fluxos e Escórias na Soldagem Elétrica" Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987 27 p.
- 6 - 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.p. 313s - 322s, July 1956.
- 7 - DENNI, M.A., "Eletrodos Revestidos: Armazenagem, Ressecagem e Cuidados Especiais" - Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem (F.B.T.S), 3(6): 46-51, junho 1979, 6 p.
- 8 - AWS - A 5.5 - 81 "Specification for Low Alloy Steel Covered Arc Welding Electrodes", American Welding Society - 1981, 29 p.
- 9 - SANTOS, F. J. M., "Controle do Hidrogênio em Juntas Soldadas por Eletrodos Revestidos" (COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 1984) 102 p.

- 10 - HIRAI, Y., MINAKAWA, S. and TSUBOI, J. "Prediction of Diffusible Hydrogen Content in Deposited Doc II Metals With Basic Type Covered Electrodes", Doc. IIW/IIS-II-929-80, July 1980, 26 p.
- 11 - LINNERT, G.E. "Welding Metallurgy: Carbon and Alloy Steels" vol. II, AWS, New York - 1967.
- 12 - PALMA, J.A., TIMERMAN R., "Ciência y Técnica de la Soldadura II", Ediciones CONARCO Alambres y Soldaduras S.A - Buenos Aires - Argentina - 1983, 260 p.
- 13 - REBELLO, J.M.A. "Soldagem II" - IBQN - Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear, 132 p.
- 14 - ALCANTARA, N. G., "Tecnologia da Soldagem" (DEMa-UFSCar) 1987, 192 p.
- 15 - SALTER, G.R. "Hydrogen Absorption in Arc Welding", British Welding Journal, June 1963.
- 16 - COE, F.R. "Welding Steels Without Hydrogen Cracking", The Welding Institute, 1973, 68 p.
- 17 - JENKINS, N., COE, F. R., "Hydrogen Analysis at BWRA", British Welding Research Association Bulletin, parts 1,2 e 3 - 1966.
- 18 - ALCANTARA, N.G. and ROGERSON, J.H. "A Prediction Diagram For Preventing Hydrogen-Assisted Cracking in Weld Metal", Welding Journal, U.S.A, 63(3), 116s - 122s, april 1984.
- 19 - HANSLER, J.H., GRAHAM, J.W, CULLEN, G.V., "Cold Cracking Tests For Determination of Weldability - Assessment of the TEKKEN Test" - AUSTRALIAN WELDING RESEARCH (12), 1970, 1-12 p.
- 20 - Catálogos para Aplicações de Eletrodos da ARCOS - Solda Elétrica Autógena SA, ESAB - Eletro Solda Autógena Industrial SA e NICROSOL - Indústria e Comércio de Soldas Especiais Ltda.

- 21 - JOELE, R., "Controle de Umidade no Revestimento de Eletrodos para Soldagem", (COPPE/UFRJ, M. Sc, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 1981), 72 p.
- 22 - SUBBARAO, E.C., CHAKRAVARTY, D., MERRIAM, M.F., RAGHAVAN, V., SINGHAL, L.K., "Experiências de Ciências dos Materiais", Edgard Bhucher, Editora da Universidade de São Paulo - São Paulo - 1963.
- 23 - SEABRA, A.V., OLIVEIRA, M.M., SOARES, L., "Metalografia Quantitativa", Laboratório Nacional de Engenharia Civil - (memória nº 564) - Lisboa - 1981.
- 24 - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa do Algodão - CNPA.
- 25 - Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA - Catálogo LINHA DE PRODUTOS (PRODUCTS LINE) - São Paulo - Brasil.