

COMPANHIA BRASILEIRA DE TECNOLOGIA NUCLEAR  
Instituto de Pesquisas Radioativas

ESTUDOS COMPLEMENTARES DO TANQUE DE REVESTIMENTO EM  
ALUMÍNIO DO REATOR IPR-R1

Crepaldi, R.

Belo Horizonte

1975

ESTUDOS COMPLEMENTARES DO PROJETO DO TANQUE  
DE REVESTIMENTO EM ALUMÍNIO DO REATOR IPR-R1

ROBERTO CREPALDI

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESTUDOS COMPLEMENTARES DO PROJETO DO TANQUE DE REVESTIMENTO EM ALUMÍNIO DO REATOR IPR-R1

por

ROBERTO CREPALDI

orientador: Eng<sup>o</sup> PAULO EDSON CARDOSO

TESE APRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS

Belo Horizonte, março/1975

À

Lindalva

Frederico

Rodrigo

Gustavo

com o meu afeto.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Hilton Vieira Campos, Diretor do Instituto de Pesquisas Radioativas, por permitir a realização deste trabalho;

Aos Eng<sup>os</sup> Omar Campos Ferreira e Virgílio Mattos de Andrade e Silva, pelo apoio concedido;

Ao Eng<sup>o</sup> Paulo Edson Cardoso, pela orientação segura e eficiente com que conduziu o trabalho;

Ao Dr. Elias Mansur Netto, Eng<sup>os</sup> Clóvis Walter Rodrigues e Valdir Mendonça de Lima, pelas sugestões.

Aos técnicos Neder Mansur e Zilmar Lima Lula, pela colaboração nos ensaios de corrosão;

Aos técnicos dos Laboratórios de Análises Química e Instrumental, Metalurgia, Oficina Mecânica e Reator, pela colaboração;

Ao Serviço de Documentação Técnica, Seção de Desenho, Setor Gráfico e de reproduções, pela inestimável ajuda;

A Srta. Vera do Pilar Costa, pelo esmero e eficiência na datilografia do trabalho;

A Universidade Federal de Minas Gerais, Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear e Comissão Nacional de Energia Nuclear.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. <u>INTRODUÇÃO</u>	1
1.1. Especificação do material	2
1.2. Dimensionamento do tanque	3
1.3. Objetivo e trabalho.	4
2. <u>SOLDAGEM DO TANQUE</u>	7
2.1. Procedimentos de soldagem	9
2.2. Qualificação das soldas	11
2.2.1. Eletrodo de soldagem	12
2.2.2. Vareta de enchimento	13
2.2.3. Gás de soldagem	14
2.2.4. Ensaio de qualificação	14
.Raios-X	15
.Líquido penetrante	20
2.2.5. Ensaio de qualificação	
complementares	22
.Ensaio de tração	22
.Ensaio de corrosão	26
.Ensaio de dureza	27
3. <u>CORROSÃO DO ALUMÍNIO</u>	29
3.1. Procedimento experimental	30
3.1.1. Preparação das amostras	30
3.1.2. As experiências de corrosão	31
3.1.3. Análise dos produtos de corrosão	33
3.2. Resultados experimentais	34
3.2.1. Temperatura de 40°C	37
3.2.2. Temperatura de 60°C	37
3.2.3. Temperatura de 80°C	37
3.2.4. Temperatura variável	37
3.3. Discussão	42
3.4. Conclusões	51

	<u>Pág.</u>
4. <u>EFEITO DE RADIAÇÃO NO ALUMÍNIO</u>	53
5. <u>PROTEÇÃO RADIOLÓGICA</u>	56
5.1. Atividade induzida no tanque	56
5.1.1. Considerações iniciais	56
5.1.2. Cálculo das atividades	59
5.2. Taxa de exposição no topo do reator	61
6. <u>CONCLUSÕES</u>	67
7. <u>BIBLIOGRAFIA</u>	
APÊNDICE 1	
APÊNDICE 2	

## 1. INTRODUÇÃO

O reator TRIGA Mark I do Instituto de Pesquisas Radioativas da Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear, de fabricação da Gulf General Atomic /1/, é um reator tipo piscina enterrado no solo e que funciona desde novembro de 1960 para potência máxima de 100 Kw.

Devido ao grande crescimento na produção de isótopos de altas atividades, principalmente para uso em experiências de sedimentologia, além do uso do reator para outros tipos de experiências, tais como em neutrônica, decidiu-se pelo aumento de sua potência para 250 Kw em regime contínuo /2/.

Assim, para o funcionamento a potências mais altas, além das modificações na configuração do núcleo com acréscimo de novos elementos combustíveis, modificações na mesa de controle, instalação de um novo sistema de refrigeração (já funcionando), é necessário alterações no sistema estrutural tal como a instalação de um novo revestimento no poço do reator /2/.

A necessidade de se instalar este novo revestimento, deve-se ao fato da resina epoxy, ora existente nas paredes do poço estar danificada, e a substituição por outra não ser viável devido a sua limitada duração às novas condições de operação /2/.

O material escolhido para o novo revestimento foi o alumínio devido às suas propriedades nucleares adequadas (baixa seção de choque de absorção de nêutrons térmicos e meia-vida curta), pelas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e efeito de radiação. O alu



mínio é extensivamente usado em reatores, principalmente para revestimento de elementos combustíveis, barras de controle e revestimento do núcleo, tanto na forma de alumínio puro (limitado a reatores de pesquisa e produção de plutônio) como na forma de ligas /3-4-5-6/.

O tanque de alumínio será colocado num poço cilíndrico de diâmetro máximo 198,1 cm e mínimo de 195,7 cm, tendo uma profundidade de 635,5 cm. Terá a finalidade de armazenar o núcleo e aproximadamente 19.000 litros de água deionizada que serve de blindagem biológica e de refrigerador do sistema.

A temperatura da água será no máximo de 40,7°C /2/. A Figura 1 mostra em corte o reator IPR-RI.

### 1.1. Especificação do material

A liga escolhida para a fabricação foi a liga de alumínio AA-5052, liga esta indicada e utilizada pela Gulf General Atomic /7-8/ na fabricação de reatores tipo TRIGA e especificada de acordo com a norma SB-209 da Seção 2 da ASME /9/. Esta liga além de apresentar boas propriedades mecânicas e excelente comportamento à corrosão, apresenta boas características de fabricabilidade (usinagem, calandragem, solda, etc) além de ser fabricada no Brasil em chapas de dimensões adequadas para a fabricação do tanque.

A única alteração na liga foi o teor de cobre passando de no máximo 1.000 ppm para 200 ppm /2-10/. Esta alteração foi necessária para atender o uso nuclear da liga e deve-se ao fato do cobre em água, ser altamente nocivo à resistência à corrosão do alumínio /11/.

A Tabela 1 mostra a composição química da liga AA-5052.

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA AA-5052 /9/

ELEMENTO	TEOR (%) <sup>a</sup>
Silício + Ferro	0,45
Cobre	0,10 <sup>b</sup>
Manganês	0,10
Magnésio	2,2 - 2,8
Cromo	0,15-0,35
Zinco	0,10
Alumínio	restante
Outros	máximo de 0,15

a: teor máximo quando não é dado o intervalo

b: teor alterado para 0,02%

### 1.2. Dimensionamento do tanque

Conhecidos o diâmetro e altura reais do poço do reator, dimensionou-se o tanque levando-se ainda em conta a necessidade de se revestir externamente o tanque.

A espessura da chapa lateral foi dimensionada utilizando-se as normas da Seção 3 da ASME /12/, para vasos de pressão cilíndricos. No cálculo considerou-se a pressão no fundo do poço devido à coluna d'água (0,6 kg/cm<sup>2</sup>) e o peso do tanque com os componentes do núcleo do reator (aprox. 2.400 kg). Assim, esta espessu-

ra foi calculada para ter no mínimo 1/4" (6,35 mm).

O diâmetro externo e interno foram dimensionados considerando-se a necessidade de colocação de concreto para ancoragem lateral, e na altura, levou-se em conta o sistema de ancoragem tanto no fundo como na parte superior do tanque.

No Desenho 1 tem-se o tanque em detalhes os sistemas de ancoragem inferior e superior.

### 1.3. Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho foi complementar o projeto do tanque e os itens estudados foram:

- . soldagem das chapas do tanque
- . controle de qualidade da solda
- . corrosão no alumínio
- . efeitos de radiação
- . segurança radiológica do reator, considerando-se a introdução do tanque no poço.

Nestes itens, procurou-se estudar os vários aspectos do projeto inicial do tanque, discutindo-se problemas importantes para a execução e, principalmente, após a instalação, no poço do reator face a interação do tanque com o núcleo.

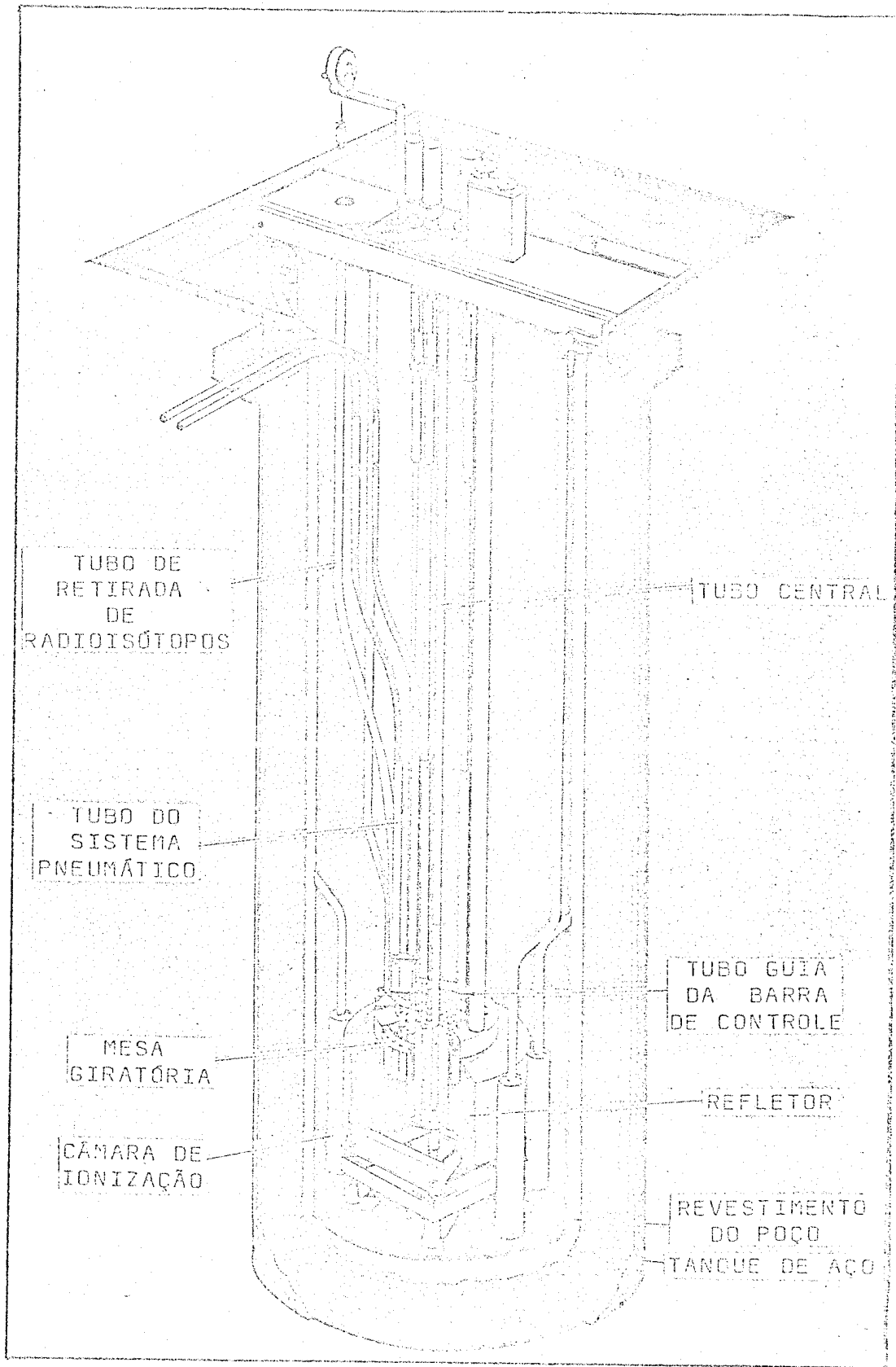
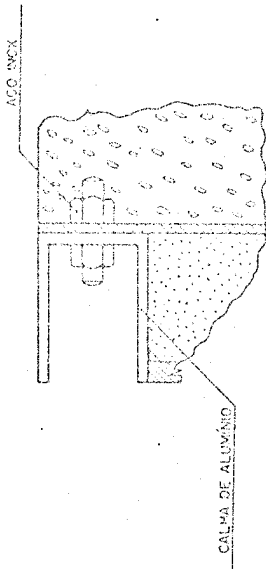


FIG. 1.1. - VISTA EM CORTE DO REATOR IPR-RT MOSTRANDO O NÚCLEO E O REFLETOR

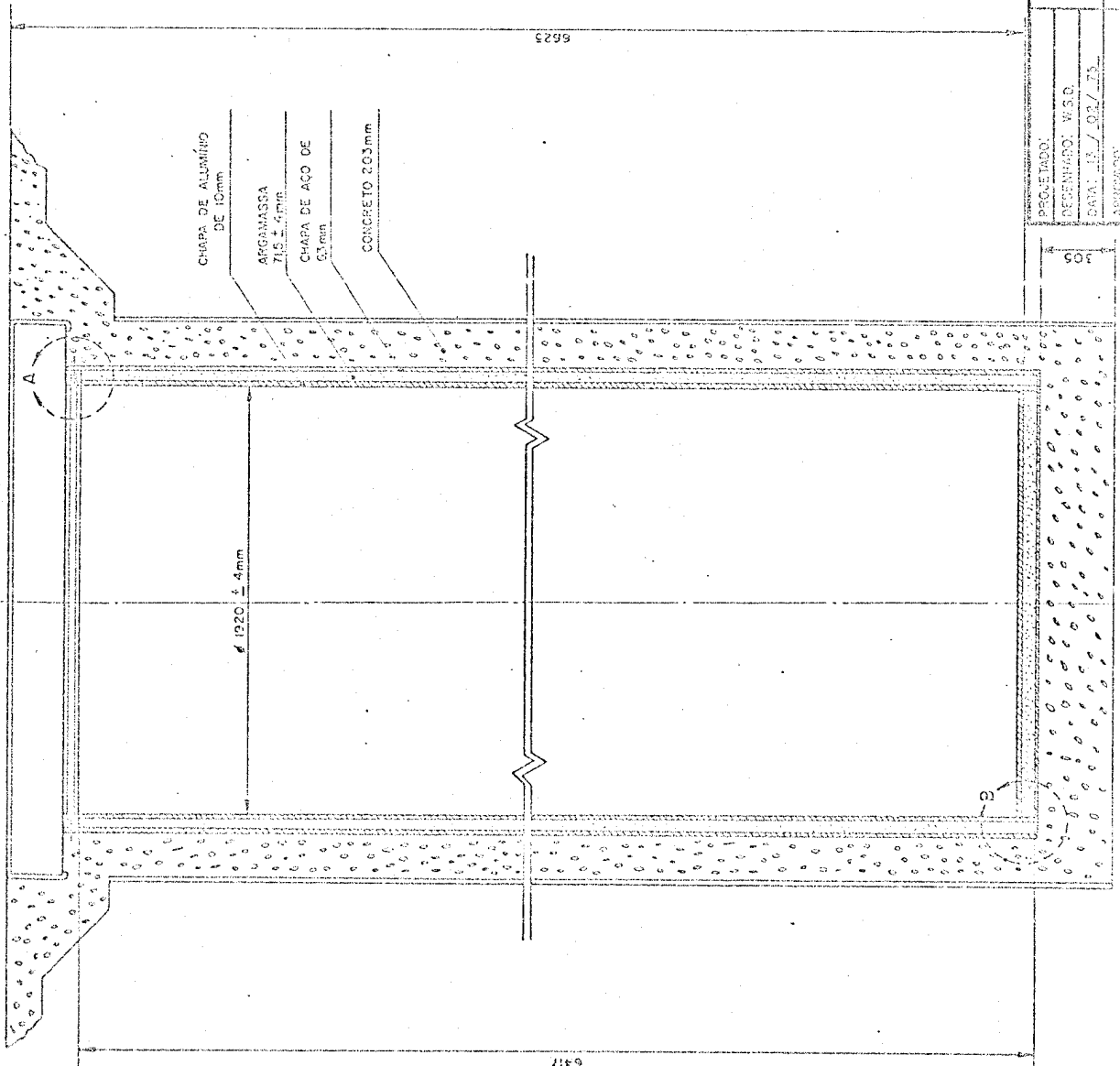
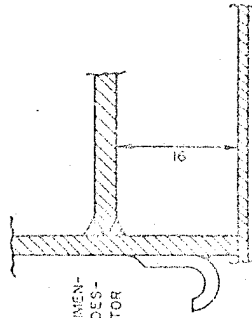
DETALHE - A

DES. O PERFIL SERÁ DIMENSIONADO APÓS A DEPENDÊNCIA DO REATOR



DETALHE - B

DES. O CANCHO SERÁ DIMENSIONADO APÓS A DESMONTAGEM DO REATOR



CHAPA DE ALUMÍNIO DE 10mm  
 ARGAMASSA 7/15 4/100  
 CHAPA DE AÇO DE 31mm  
 CONCRETO 203mm

120 x 4mm

COMPANHIA BRASILEIRA DE TECNOLOGIA NUCLEAR - I.P.R.		ESCALA
TANQUE DE ALUMÍNIO PARA REVESTIMENTO DO POÇO	PROJETO	REVISÃO
	DESENHO	
PROJETADO: W.S.O.	REVISADO: W.S.O.	DATA: 11/02/70
APROVADO:	REVISADO:	DATA:
REG. Nº	REV. Nº	1

5623

6417

## 2. SOLDAGEM DO TANQUE

Um dos itens mais importantes na fabricação do tanque de revestimento em alumínio, se refere à soldagem e ao controle de qualidade da solda resultante. Dois processos de soldagem são recomendados /7-8-13-14/:

- . TIG (Tungsten Inert Gas shielded arc)
- . MIG (Metal Inert Gas shielded consumable electrode)

Foram realizados neste trabalho, visando a escolha do processo da soldagem, vários ensaios de soldagem em chapas testes de alumínio, e após o exame das soldas usando raios-X e líquido penetrante, concluiu-se que o processo de soldagem TIG produz, neste caso, soldas de melhores qualidades. Os seguintes defeitos de soldagem foram analisados:

- . falta de penetração do cordão de solda
- . porosidades
- . fusão incompleta
- . trincas
- . inclusões

Estes defeitos podem ser causados pelo uso incorreto do processo de soldagem, vareta de enchimento inadequada, limpeza incompleta e condições de trabalho insatisfatório /15/. Desta maneira procurou-se otimizar os parâmetros e procedimentos envolvidos na soldagem, visando-se a qualificação das soldas.

Foram realizados cerca de 82 ensaios de soldagem em chapas testes e os parâmetros indicados na Tabela 2 são resultados dos valores indicados nas normas da AWS /15-16/ e valores experimentais dos ensaios de soldagem realizados neste trabalho, considerando-se o tipo de eletrodo, a vareta de enchimento e os procedimentos de soldagem.

TABELA 2 - PARÂMETROS DE SOLDAGEM DAS CHAPAS /15-16/

Posição de soldagem:	plana
Pré-aquecimento:	não
Número de passes:	dois
Diâmetro da vareta:	3/16" - 1/4"
Diâmetro do eletrodo:	1/4"
Diâmetro do bocal:	5/8"
Vazão de argônio:	13 - 18 l/min
Corrente (C.A.) :	230 - 300 A
Vel. de trabalho:	8 - 10 pol/min
Consumo de vareta:	8 kg/1.200 pol.
Chanfro chapa lateral:	

The diagram shows a cross-section of a V-groove joint between two rectangular plates. The groove angle is labeled as 60°. The root opening (the gap at the bottom of the groove) is labeled as 3/32". The root face width (the distance from the centerline of the groove to the edge of the plate) is labeled as 1/8".

Quanto ao chanfro das chapas laterais, dois tipos foram testados, 45º duplo e 60º simples em juntas de topo. Em qualquer dos dois tipos os resultados foram satisfatórios, mas devido a facilidade de execução, sugere-se o de 60º simples, como indicado na Tabela 2.

Para a soldagem da chapa do fundo nos anéis laterais, não foram testados chanfros mas, sugere-se o chanfro indicado na referência /17/.

### 2.1. Procedimentos de soldagem

Os procedimentos de soldagem se basearam nas referências /7-8-15-16/ e são descritos abaixo:

1. O equipamento é o convencional para soldagem TIG desde que tenha alta capacidade de corrente (até 400 A), e estabilização de corrente satisfatória.
2. A corrente usada no processo deve ser a alternada.
3. O bocal deve ser de cerâmica para se evitar possível contaminação da solda quando se usa bocais metálicos.
4. Para evitar inclusões de tungstênio deve-se manter o arco estável.
5. Deve-se iniciar o arco num bloco de alumínio junto da peça, utilizando-se alta frequência para abrir o arco, sem haver contato eletrodo-bloco. Esta técnica evita a inclusão de tungstênio no início da soldagem.
6. Para manutenção de uma boa penetração usa-se como regra, manter o comprimento do arco aproximadamente igual ao diâmetro do eletrodo.



7. A tocha deve estar na linha de centro da junta e fazendo um ângulo de 75-85° sobre o plano de soldagem.
8. Deve-se usar a velocidade de trabalho indicada na Tabela 2 para se ter boa qualidade de solda.
9. Para se extinguir o arco deve-se reduzir a corrente gradativamente para permitir uma solidificação vagarosa da poça de solda.
10. A altura do cordão de solda deve ser no máximo de 1/16" (1,6 mm).
11. O gás usado deve ser o argônio com pureza mínima de 99,95%, e fluxo suficiente para proteger a região de solda durante a soldagem, e no resfriamento.
12. Limpeza
  - a. junta
    - 12.a.1. as juntas devem ser preparadas para que haja completa fusão e penetração entre as partes.
    - 12.a.2. as superfícies ao redor devem ser limpas e livres de quaisquer materiais até à distância de 5 cm das juntas.
    - 12.a.3. antes da soldagem, até à distância de 3 cm de cada lado da junta, deve-se remover o óxido de alumínio, usando-se somente escova de aço inoxidável.
    - 12.a.4. antes da soldagem, mas após a limpeza com a escova, as juntas devem ser limpas com álcool metílico ou solução de álcool + benzeno + acetona (1x1x1) para remoção de óleos, graxas da região de solda.

- 12.a.5. em seguida, o local deve ser lavado com água destilada até se constatar a ausência de corpos estranhos.
- 12.a.6. em seguida seca-se o local procurando -se trabalhar com luvas para não haver contaminação.
- 12.a.7. as bordas das juntas não devem ter contato com outros materiais para evitar contaminação.
- 12.a.8. após a execução do primeiro passe, este deve ser limpo com escovas de aço inoxidável usando-se os mesmos procedimentos 5, 6 e 7, antes de depositar o outro passe.

b. varcetas de enchimento

- 12.b.1. devem ser estocadas em áreas separadas de outros materiais para evitar contaminação.
- 12.b.2. a área de estocagem não deve ser úmida.
- 12.b.3. retirar da área de estocagem somente no momento do uso.
- 12.b.4. antes de serem usadas devem ser limpas e secas usando os mesmos procedimentos 5, 6 e 7 do item a.

2.2. Qualificação da solda

Para a adequada qualificação das soldas, além dos parâmetros e procedimentos de soldagem corretos, mã-

quina de soldagem adequada, e operador qualificado, três aspectos são ainda importantes para se conseguir uma solda com qualificações exigidas nas especificações da ASME, Seções 8 e 9 /12-18/ e da Gulf General Atomic /7-8/:

- . Eletrodo de soldagem
- . Vareta de enchimento
- . Gás de soldagem

#### 2.2.1. Eletrodo de soldagem

Três tipos de eletrodos podem ser usados no processo TIG:

- . Eletrodo de tungstênio puro
- . Eletrodo de tungstênio torinado
- . Eletrodo de tungstênio zirconado

Os dois primeiros permitem boa estabilidade do arco e boa resistência a contaminação, mas ao torinado pode-se acrescentar a vantagem de facilitar a abertura do arco, devido a maior emissividade. O zirconado é usado quando se quer uma ausência total de inclusões de tungstênio sendo excelente para uso com corrente alternada /14-19-20/.

Quanto ao tipo a ser usado, alguns autores /14-19-20/ recomendam o torinado ou puro, enquanto outros indicam o uso do zirconado /15-16/.

Para a escolha do tipo a ser usado, foram realizados ensaios de soldagem e constatou-se que o eletrodo zirconado é muito mais eficiente, permitindo uma boa estabilidade do arco e ausência de contaminação.

### 2.2.2. Vareta de enchimento

As soldas do tanque requererão material de enchimento nas juntas de soldagem, e a composição química da vareta de enchimento é importante tanto na soldagem como nas propriedades mecânicas e de corrosão da junta soldada.

Para a soldagem da liga AA-5052 são recomendadas as varetas de enchimento com teor de magnésio acima de 2,5%, devido as suas qualidades de soldagem e boa resistência a corrosão e adequadas propriedades mecânicas da junta soldada /7-8-11-15-16-19-21-22-23/. No entanto, devido às dificuldades de se encontrar no mercado nacional varetas de enchimento com esse teor de magnésio, foram realizados os ensaios de soldagem com varetas de alumínio comercial (99,5%). Os resultados de soldagens foram satisfatórios e propriedades mecânicas da solda e resistência à corrosão foram medidas em ensaios de tração e dureza, e ensaios de corrosão, que serão descritos no item 2.2.5.

Na Tabela 3 tem-se a composição química da liga da vareta de enchimento utilizada.

TABELA 3 - COMPOSIÇÃO DA VARETA DE ENCHIMENTO  
/24/

ELEMENTO	TEOR (%)
Cádmio	0,0008
Cromo	0,0009
Cobre	0,0010
Ferro	0,15
Magnésio	0,0004
Manganês	0,0047
Chumbo	0,0039
Silício	0,11
Titânio	0,0036
Zinco	0,0105

### 2.2.3. Gás de soldagem

O gás de soldagem recomendado é argônio e a pureza mínima é de 99,95% /7-8/. A exigência de pureza do gás se deve ao fato de que impurezas de  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $O_2$  e gases orgânicos produzirão defeitos nas soldas como porosidades e oxidação do cordão de solda /15/. Os ensaios de soldagem realizados mostraram ser viável a utilização de argônio nacional e que corresponde àquela pureza.

### 2.2.4. Ensaio de qualificação

Em paralelo aos ensaios de soldagem procurou -se desenvolver o controle de qualidade das soldas utilizando-se raios-X e líquido penetrante.

## Raios X

Através de raios-X pode-se controlar os principais defeitos inerentes à solda e ao processo de soldagem, quais sejam, trincas, porosidades, fusão incompleta, falta de penetração e inclusões.

Um dos defeitos mais comuns em soldas de alumínio são as trincas que podem ocorrer em forma longitudinal ou em cratera. Em qualquer dos tipos o seu aparecimento deve ser evitado porque afetam a resistência da solda /15-16/.

Outro tipo de defeito são as porosidades, que são bolhas de gás ou vazios. Pequenas quantidades espalhadas uniformemente nas soldas não afetam sua resistência. A maior causa de aparecimento das porosidades é o hidrogênio que durante a soldagem penetra na poça de solda. Outra causa pode ser a presença de corpos estranhos tais como, óleo, graxa, etc. /15/.

Quanto às inclusões, os tipos mais comuns são as de tungstênio, de cobre e de óxidos. As inclusões de tungstênio resultam da fusão e deposição de tungstênio na solda. Devem ser evitadas, principalmente porque podem afetar a resistência à corrosão da solda /15/. As inclusões de cobre são também prejudiciais a resistência à corrosão sendo por isto conveniente somente o uso de bocal de cerâmica. As inclusões de óxidos são bastante prejudiciais a resistência da solda e são causadas principalmente pelo fluxo insuficiente de gás, devendo ser evitado o seu aparecimento /16/.

Os outros tipos de defeitos comuns são a fusão incompleta (fusão incompleta do metal base ou da vareta) e a falta de penetração, que é o não enchimento de toda a profundidade da junta, sendo a causa mais comum

de tais defeitos, a utilização da junta com projeto inadequado /15/.

O equipamento de raios-X utilizado para o controle das soldas experimentais realizadas, tem as seguintes características /25/.

Marca: BALTEAU, tipo panorâmico ortogonal

Faixa de utilização: 80 a 300 kV

Amperagem: 3 mA

Foco: 4x1,3 mm

A vantagem de se utilizar este tipo de foco (panorâmico ortogonal) é que se tem melhor qualidade de radiografia comparado com os outros dois tipos: direcional e panorâmico oblíquo, apesar de que o tempo de exposição ser maior, da ordem de duas vezes comparado ao panorâmico oblíquo e ao direcional.

Para as radiografias a serem executadas no tanque, o equipamento a ser utilizado poderá ser o citado acima ou, um outro, marca PICKEN-AMBRIEX com faixa de utilização de 60 a 150 kV e amperagem 6 mA, tendo, no entanto, foco direcional e que não impedirá de se obter boa qualidade nas radiografias uma vez que a voltagem poderá ser menor (60 kV).

Os exames foram efetuados baseando-se em normas internacionais de controle de qualidade (seção UW-51 da ASME /12/) e os procedimentos foram os seguintes:

#### 1. Limpeza das juntas

As juntas foram, antes de serem radiografadas, lixadas e limpas com solvente para retirar todo e qualquer material que pudesse dar interpretação errônea dos resultados.

## 2. Indicador de Qualidade de Imagem (IQI).

Para a espessura da chapa (-10mm) o IQI indicado pelas normas UW-51 /12/, e que foi usado nos ensaios, devendo conseqüentemente ser usado no tanque é o indicado na Figura 2. A radiografia é aceitável se a fenda é perfeitamente visível sobre o filme, não sendo necessário que os furos apareçam claramente.

## 3. Escolha da energia e do filme

A voltagem recomendada pela norma é de 50 kV. No entanto, o equipamento disponível no IPR é de voltagem mínima de 80 kV. Para compensar este aumento de voltagem, o filme recomendado é do tipo de grão extra-fino do tipo GEVAERT D2 ou D4. Não havendo, entretanto, usou-se GEVAERT D7 sendo aceito pelas normas devido à qualidade satisfatória da imagem.

## 4. Condições de exame

As condições usadas nos exames foram as seguintes:

- . Voltagem: 80 kV
- . Amperagem: 3 mA
- . Distância fonte-filme: 60 cm
- . Tempo de exposição: 15 min
- . Filme: GEVAERT D7
- . Identificação: letras e nºs de chumbo com 0,15 mm de espessura.

Os critérios de aceitação das soldas, através de radiografias, foram baseados nas normas da ASME, Seção 8 /12/, onde são aceitas as soldas nas seguintes condições:



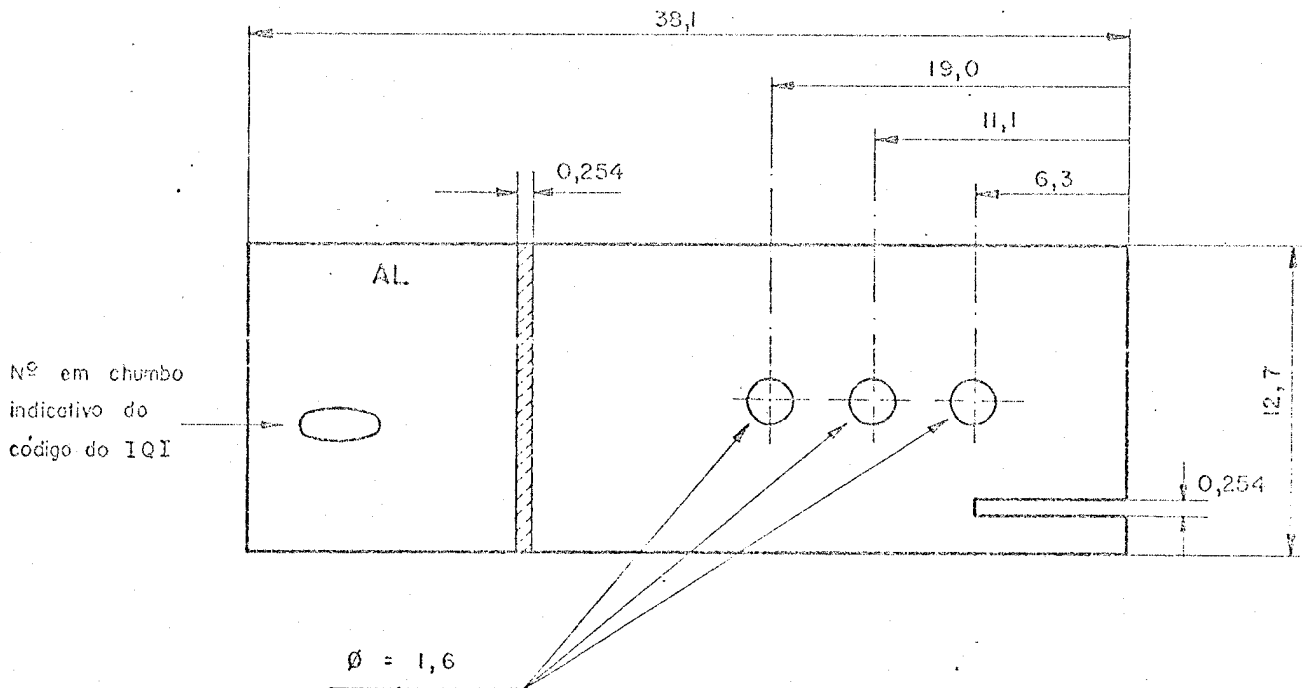


FIGURA 2 - INDICADOR DE QUALIDADE DE IMAGEM  
 USADOS NOS EXAMES DE RAIOS-X (Cf.  
 ASME /12/)

1. Não conter qualquer tipo de trinca, zona de penetração ou fusão incompleta.
2. Não conter qualquer tipo de inclusões de escória, cujo comprimento seja maior que 1/4" (6,35 mm). As inclusões de tungstênio acompanhadas de óxidos não se enquadram neste caso, devendo sempre serem rejeitadas /26/.
3. Não conter qualquer grupo de inclusão de escórias alinhadas, cuja soma dos seus comprimentos seja maior que a espessura da solda num comprimento doze vezes esta espessura. Quando a distância entre as inclusões é maior que seis vezes o comprimento da maior inclusão, a solda pode ser aceita. As inclusões de óxido em linha não se enquadram neste caso, devendo sempre serem rejeitadas /26/.
4. Para aceitação de porosidades, deve-se obedecer os seguintes critérios:
  - . qualquer imagem escura, geralmente oval ou circular deve ser interpretada como porosidade.
  - . a área total das porosidades não deve exceder a  $0,060T \text{ in}^2$  ( $1,52T \text{ mm}^2$ ), sendo T a espessura da solda, considerando-se uma solda de 6 in (152,4 mm) de comprimento. Se o comprimento da solda é menor, a área deve ser reduzida proporcionalmente.
  - . o tamanho máximo do poro deve ser 20% da espessura da solda, exceto quando o poro está distante de outro de 1 in (25,4 mm) podendo então ter 30% da espessura da solda.
  - . porosidades alinhadas podem ser aceitas desde que a soma dos diâmetros dos poros não sejam maior que a espessura da solda num comprimento doze vezes esta espessura, sendo que os poros devem ser separados de pelo menos seis vezes o diâmetro do maior poro.

Na Figura 3 tem-se um mapa característico de porosidades. Qualquer variação é permitida com exceção das dimensões e números máximos de poros para cada tipo de situação.

#### Líquidos penetrantes

Além dos ensaios de raios-X foram realizados em algumas placas, exames de líquidos penetrantes. Estes exames das soldas visaram a detecção de defeitos na superfície (trincas, fissuras, etc.).

O material utilizado nos exames foi de marca SUPER-CHECK de fabricação da TOKUSHU TORYO CO. LTD, Japão, constando de removedor, penetrante e o revelador, todos em forma de "spray".

Os procedimentos para execução dos exames são os do apêndice III da ASME Seção 8 /12/. A sequência de aplicação foi a seguinte:

1. Aplicação do removedor para retirada de óleo, graxas e sujeitas da superfície da solda.
2. Aplicação do penetrante.
3. Após um tempo de 5 min, aplicou-se o removedor para retirar o excesso de penetrante da superfície.
4. Em seguida, aplicou-se o revelador para obter-se o contraste caso houvesse defeitos superficiais.
5. Avaliação de aceite

Na avaliação dos defeitos, os seguintes conceitos são básicos:

- a) indicações lineares são aquelas nas quais o comprimento é maior que duas vezes a largura do defeito.

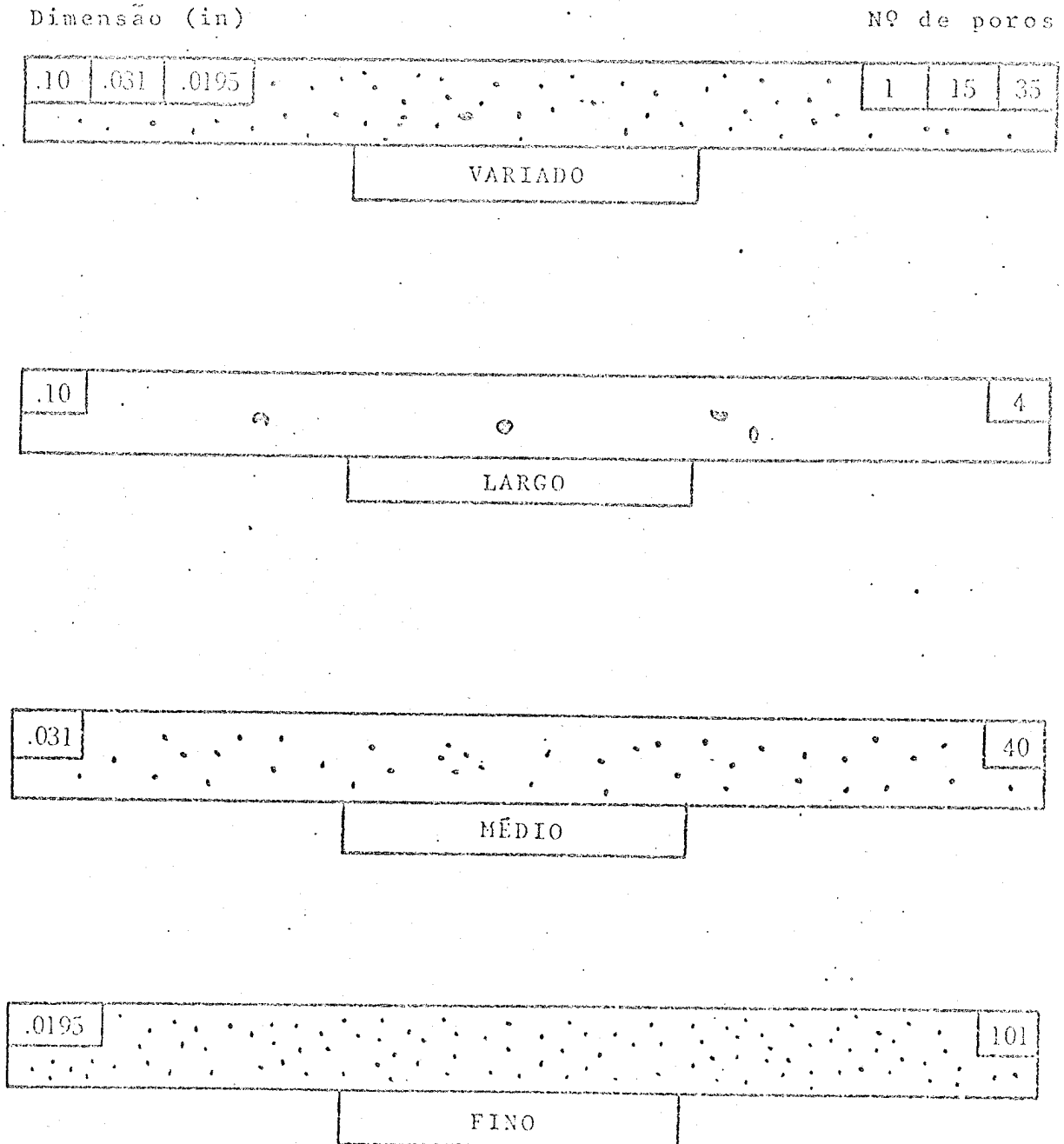


FIGURA 3 - MAPA CARACTERÍSTICO DE POROSIDADES PARA SOLDA DE 12,7 mm NUM COMPRIMENTO DE 152,4 mm (Cf. ASME /12/)

- b) indicações circulares são aquelas nas quais o comprimento é menor que duas vezes a largura do defeito.

As soldas são rejeitadas nas seguintes condições:

- . quando as superfícies examinadas apresentarem quaisquer tipo de defeitos lineares.
- . quando se tem defeitos circulares em linha, num total de quatro ou mais separados de 1/16" (1,6 mm), no máximo.
- . quando se tem defeito circular isolado com diâmetro maior que 1/16" (1,6 mm) /8/.

#### 2.2.5. Ensaios de qualificação complementares

Para complementar os exames de raios-X e líquidos penetrantes, foram realizados eventualmente ensaios de tração, dureza e de corrosão nas soldas, visando a qualificação das mesmas do ponto de vista de resistência mecânica e de resistência à corrosão. Como as juntas soldadas sofrerão esforços de tração devido a pressão da água armazenada no tanque (pressão máxima de 0,6 kg/cm<sup>2</sup>) e de compressão devido ao próprio peso dos anéis soldados, foram realizados ensaios de tração para se determinar a resistência mecânica da junta soldada. Os ensaios de corrosão foram efetuados aproximando-se às condições de operação do reator, para se determinar a resistência à corrosão da junta soldada e garantindo-se, assim, a durabilidade necessária do tanque.

#### Ensaios de tração

Nos ensaios realizados para se comprovar a resistência das juntas soldadas, utilizou-se uma máquina universal de teste INSTRON.

Dois tipos de soldas foram testadas, uma soldada com vareta de enchimento comercial (99,5%) e outra com vareta especial ER-5654 (2,5% Mg). Foram retirados de cada placa três corpos de prova que foram dimensionados de acordo com a norma E3 da ASTM, seção 31 /27/ e ASME, Seção 9 /13/. Na Figura 4 tem-se o desenho do corpo de prova utilizado.

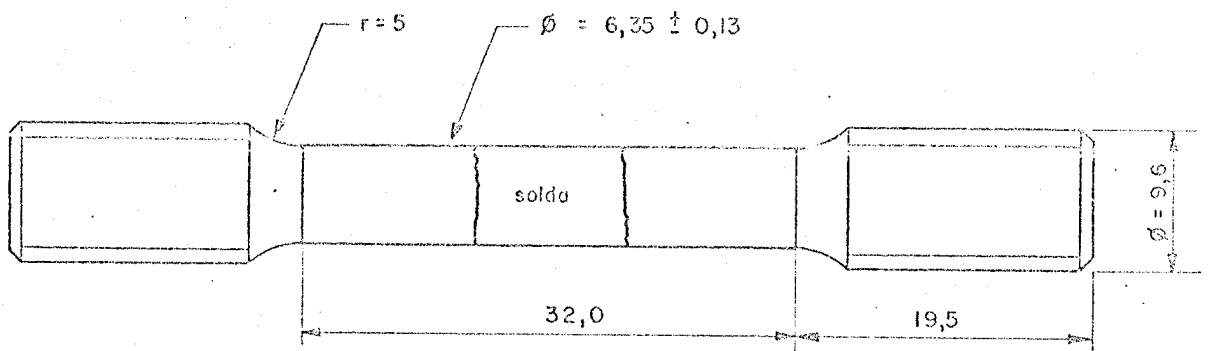
As chapas utilizadas foram radiografadas não tendo sido constatado defeitos que pudessem prejudicar os ensaios.

As condições dos ensaios foram:

- . vel. da máquina: 0,1 cm/min
- . vel. de deformação: 0,03 m<sup>-1</sup>
- . carga máxima: 1.000 kg
- . temperatura ambiente

Os ensaios mostraram que os corpos de prova soldados com vareta especial se romperam fora da região de solda, indicando ser a solda mais resistente que a liga. Para a junta soldada com a vareta comercial os corpos se romperam na solda, tendo no entanto, resistência mecânica adequada. No dimensionamento da espessura da chapa, considerou-se a resistência da solda como sendo 80% do valor do limite de escoamento da liga. Nos ensaios o valor encontrado foi de 86%, conforme pode-se verificar na Tabela 4.

É aceitável, portanto, do ponto de vista de resistência mecânica, os 2 tipos de junta soldada (com vareta especial ou comercial), sugerindo-se, no entanto, que as soldas do tanque sejam realizadas com a vareta especial (teor de Mg > 2,5%), devido as características mecânicas apresentadas (Tabela 4).



ESCALA: 2:1

FIGURA 4 - CORPO DE PROVA PARA TESTE DE TRAÇÃO  
(Cf. ASME /12/).

TABELA 4 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA AA-5052 SOLDADA  
E NÃO SOLDADA

PROPRIEDADES	JUNTA SOLDADA COM VARETA COMERCIAL	JUNTA SOLDADA COM VARETA ESPECIAL	PLACA NÃO SOLDADA AA-5052 (ALCAN)
Limite de escoamento (kg/cm <sup>2</sup> )	792	850	915
Limite de resistência (kg/cm <sup>2</sup> )	1.620	2.126	2.060
Limite de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	-	1.560	1.550
Elongação (%)	12,5	26,0	27,5
Dureza Brinell	35,2	-	48,6



## Ensaio de corrosão

Para estudar o comportamento do alumínio após colocação no poço do reator, quanto à sua resistência à corrosão, foram realizados vários ensaios de corrosão na liga AA-5052 soldada com vareta de enchimento de alumínio comercial (99,5%) e condições descritas no capítulo 3. Na Tabela 5 apresenta-se os resultados dos ensaios.

TABELA 5 - TEORES DE AL DISSOLVIDOS EM ÁGUA

TEMPERATURA (°C)	TEMPO (DIAS)	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$ AL DISSOLVIDO
40	90	1,4
60	90	4,6
80	8	9,4

Os resultados mostraram que a diluição do Al na água é muito pequena, apesar das tensões impostas durante a soldagem. Isto pode ser comparado com os resultados obtidos nos ensaios de corrosão com a liga do tanque (Capítulo 3) para as várias temperaturas. Pode-se ver que os valores encontrados estão dentro dos valores obtidos para a liga não soldada, indicando ser a corrosão pequena.

Para as chapas soldadas com vareta de enchimento especial (2,5% Mg), espera-se que estes resultados sejam menores, já que este tipo de soldagem (com vareta especial) é mais resistente à corrosão.

## Ensaio de dureza

Para verificar o efeito térmico ao longo da junta soldada, foram realizados ensaios de dureza utilizando-se uma máquina de teste WOLPERT.

Os ensaios realizados foram o Brinell nas seguintes condições:

- . penetrador: esfera de 2,5 mm
- . carga: 31,25 kg.

As amostras foram polidas mecanicamente para perfeita execução do ensaio.

Os resultados mostram qualitativamente os valores da dureza ao longo de uma chapa soldada. Vê-se que a dureza na região da solda é menor tendendo a crescer quando se afasta desta região. Isto está mostrado na Figura 5. Este gráfico obtido está de acordo com uma curva indicada na referência /21/ e que é mostrada na Figura 6, indicando estar a região de solda de acordo com valores apresentados na Literatura.

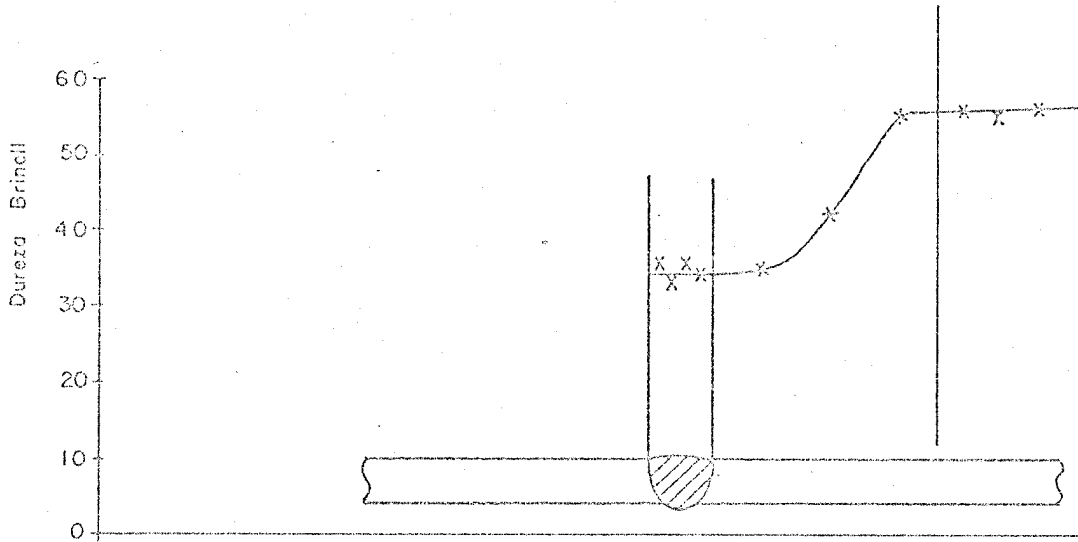


FIGURA 5-DUREZA DA LIGA AA-5052 SOLDADA

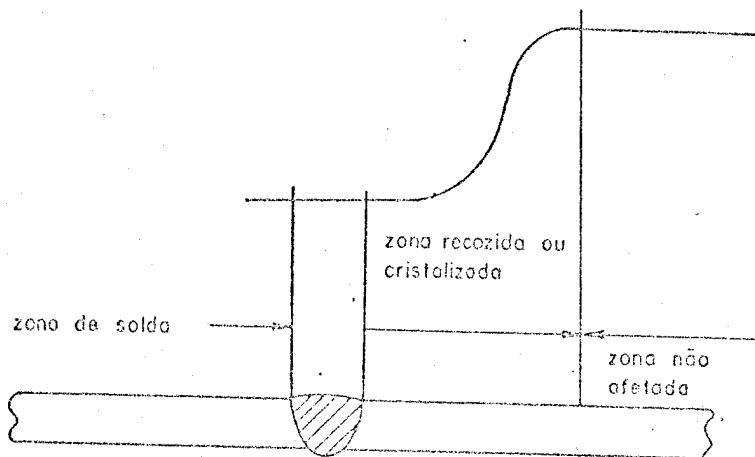


FIGURA 6-CURVA TEÓRICA PARA DUREZA EM ALUMÍNIO TRANSVERSAL À SOLDA (cf. BSI /21/)

### 3. CORROSÃO DO ALUMÍNIO

Problemas de corrosão, em baixas temperaturas, principalmente do alumínio, ocorrem em reatores tipo piscina, moderados e refrigerados a água leve /28-29-30-31 - 32-33-34-35-36/.

O interesse de se minimizar a corrosão em reatores deve-se a três fatores:

1. Ativação dos produtos de corrosão modificando as condições de segurança biológica da instalação /30-31 - 32/.
2. Aceleração da corrosão dos materiais pelos próprios produtos de corrosão /30-31-34/.
3. Aderência dos produtos de corrosão nas várias partes do sistema de refrigeração alterando a sua eficiência /30/.

Desta maneira, procura-se manter sempre o valor dos produtos de corrosão e outras impurezas a um nível mínimo através de resinas colocadas no sistema de refrigeração, como é o caso do reator IPR-R1. Assim, um objetivo deste estudo foi determinar até que ponto a colocação do tanque de alumínio poderia influir nestes níveis, realizando-se ensaios de corrosão na liga do tanque e extrapolando os resultados para o reator.

Procurou-se também, neste trabalho, verificar-se os efeitos da corrosão da liga AA5052 nas condições de temperatura de funcionamento do reator, e em condições de temperaturas mais elevadas (até 80°C).

As experiências de corrosão efetuadas foram conduzidas em água, em condições estáticas, isto é, sem movimentação do meio corrosivo (no caso água deionizada).

As experiências de corrosão em condições estáticas se aproximam das condições reais de funcionamento do reator IPR-R1 /37/.

### 3.1. Procedimento experimental

Para os estudos de corrosão da liga de alumínio AA5052, foi utilizado o método de análise por ativação (descrito adiante). Este método permite avaliar os produtos da corrosão dissolvidos na água, e possui a vantagem de alta sensibilidade e precisão de análise. O método foi utilizado com bons resultados nas medidas de teores de alumínio e cobre na água pesada da Subcrítica CAPITU /33/, sendo sua sensibilidade, para análise de alumínio dissolvido na água, de  $10^{-4}$  ppm /36/.

Os procedimentos experimentais para os estudos de corrosão foram os seguintes:

#### 3.1.1. Preparação das amostras

O material utilizado nas experiências de corrosão foi a liga do tanque AA5052.

As amostras foram cortadas obtendo-se uma área total de aproximadamente  $42 \text{ cm}^2$ . A relação desta área para o volume de água usado nas experiências reproduz a relação área/volume de água do tanque nas condições reais de funcionamento do reator.

As amostras tinham uma forma retangular com dimensões aproximadas de  $4,0 \times 3,5 \times 1,0 \text{ cm}$ .

riação de temperatura do ambiente. Foi possível controlar a temperatura da água do ensaio em  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  em temperaturas de  $30^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$ .

A água utilizada foi a mesma do poço do reator (destilada e deionizada) e o teor de impurezas da água durante os ensaios de corrosão, foi controlado pois, trocava-se periodicamente a água. Na tabela 6 tem-se as características da água.

Tabela 6 - Características da água utilizada nas experiências de corrosão /39-40/

pH	6,25 - 6,50
Condutividade	1,6 - 2,5 $\mu\text{mho/cm}$
Impurezas:	
Ferro	<0,0025 ppm
Cobre	<0,0025 ppm
Cromo	<0,001 ppm
Cálcio	<0,012 ppm
Silício	<6,0 ppm
Manganês	<0,0012 ppm
Zinco	<0,008 ppm
Cloro	<0,090 ppm
Potássio	<0,2 ppm
Sódio	<0,2 ppm
Alumínio	<0,005 ppm

As temperaturas utilizadas nas experiências de corrosão foram 40°C, 60°C, 80°C, e foi efetuado um ensaio com a temperatura variando desde 30°C até 40°C durante o ensaio.

As experiências tiveram duração total acima de 20 dias, para cada temperatura estudada, sendo a análise da água efetuada, inicialmente, em períodos curtos (12 horas), para depois serem analisados de 24 a 48 horas.

### 3.1.3. Análise dos produtos de corrosão

A água retirada do becker era imediatamente substituída por outra (de mesma composição e na temperatura do ensaio). A água retirada era então concentrada por evaporação até um volume menor possível (~ 1 ml) tomando-se cuidado para que não houvesse perda por absorção nas paredes do becker.

Em seguida, a amostra de água concentrada, era irradiada no reator IPR-R1, utilizando-se a mesa giratória (fluxo =  $6,6 \times 10^{11}$  n/cm<sup>2</sup> s) e potência de 100 Kw, durante um tempo de 5 min. Após uma espera de 1 min., a amostra era contada em um multicanal Hewlett Packard de Ge-Li de 8.000 canais, durante 1 min, utilizando-se uma gama de energia (canais) entre 1742 a 1810 para obter-se somente contagens relativas ao alumínio.

Após obtenção do espectro relativo ao alumínio, calculou-se o número total de contagens do espectro obtido através de integração da área compreendida entre as curvas e, em seguida determinou-se o teor de alumínio existente na amostra, comparando-se com padrões conhecidos de alumínio em solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (de 25 a 600 µg de Al), irradiados e analisados nas mesmas condições da amostra.

### 3.2. Resultados experimentais

O método de análise por ativação, fornece os teores de elementos da liga de alumínio, dissolvidos na água durante o processo de corrosão e sensíveis ao processo de análise. Os elementos mais importantes a serem analisados são o alumínio e o cobre. Para o cobre, os teores encontrados, mesmo à temperatura de 80°C foram desprezíveis. Os resultados dos ensaios de corrosão são pois, descritos em quantidade de alumínio dissolvido em função do tempo ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  versus tempo em dias).

Em paralelo à dissolução do alumínio na água foi observado a formação de um filme de óxido na superfície da amostra. Este filme foi estimado ter menos de  $4\mu$  de espessura no final do ensaio de corrosão para as temperaturas estudadas até 60°C e de menos de  $7\mu$  para a amostra estudada em 80°C (observação em microscópio óptico de medição). A formação do filme se deu de maneira uniforme para todas as temperaturas estudadas, e se apresentou com uma coloração marron-escura, principalmente para as temperaturas de 60°C e 80°C, onde a espessura do filme foi maior. Não foi observado visualmente a formação de "pits" na formação do filme de óxido. Microfotografias tomadas na micro-sonda eletrônica Hitachi modelo XMA-5B mostraram haver anomalias localizadas, na superfície dos filmes formados, para todas as temperaturas estudadas. As microfotografias foram tomadas após a realização dos ensaios. Estes detalhes são mostrados nas figuras 7, 8 e 9.



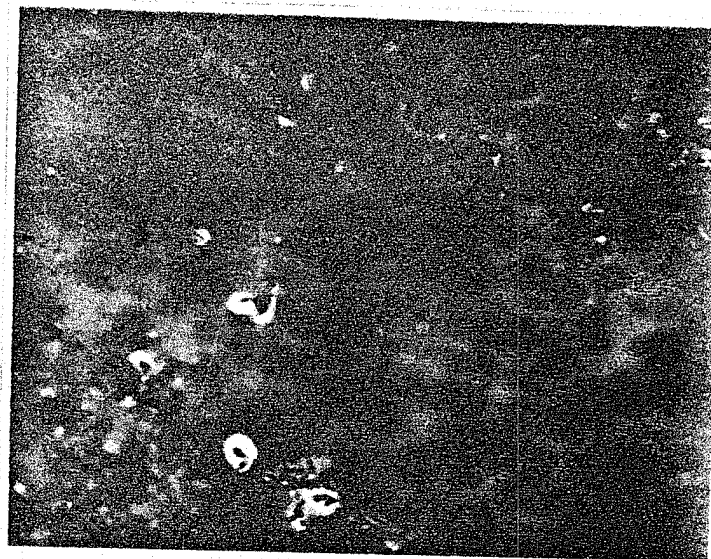


FIGURA 7 - DEFEITOS NO FILME DE CORROSÃO NA  
TEMPERATURA DE 40°C. 160 X

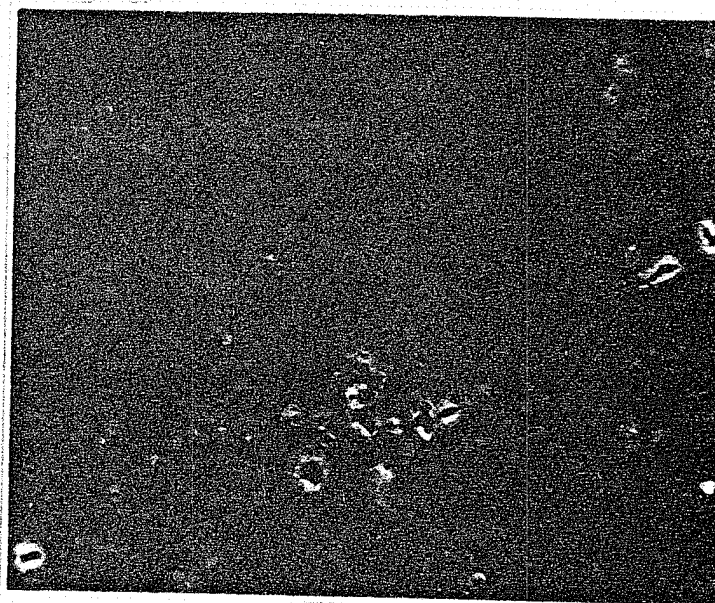


FIGURA 8 - DEFEITOS NO FILME DE CORROSÃO, NA  
TEMPERATURA DE 60°C. 160X

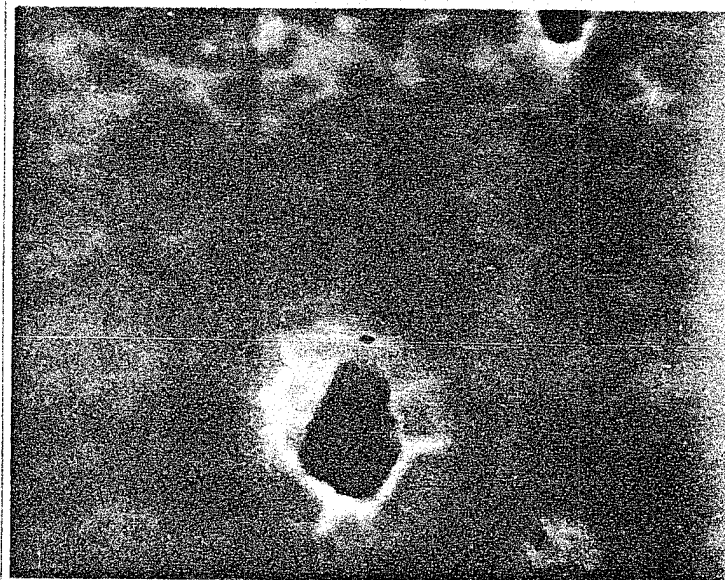


FIGURA 9 - DEFEITO NO FILME DE CORROSÃO, NA  
TEMPERATURA DE 40°C. 650X

### 3.2.1. Temperatura de 40°C

Na figura 10 tem-se a curva de corrosão obtida nessa temperatura. Foi locado quantidade total de alumínio dissolvido na água versus o tempo ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2 \times$  tempo em dias). Nota-se nesta curva a tendência à saturação na dissolução do alumínio.

### 3.2.2. Temperatura de 60°C

Na figura 11 tem-se a curva de corrosão obtida nessa temperatura. O gráfico foi traçado da mesma maneira que para a temperatura de 40°C. Nota-se a mesma tendência para a saturação, na dissolução do alumínio, verificada anteriormente, e a semelhança das duas curvas.

### 3.2.3. Temperatura de 80°C

A figura 12 mostra a curva de corrosão obtida a 80°C. Observa-se a semelhança desta curva com as duas anteriores, com a taxa de corrosão decrescendo com o tempo, embora mais lentamente.

### 3.2.4. Temperatura variável de 23°C a 34°C

Foi realizada uma experiência de corrosão com a temperatura variando de 23°C a 34°C durante o ensaio. Isto foi feito para se verificar o comportamento da liga quanto à corrosão, prevendo-se uma variação de temperatura durante o funcionamento no reator, na faixa de temperatura de projeto. A figura 13 ilustra o aspecto da curva obtida. Nesta curva pode ser observado o seguinte:

1. Saturação na corrosão em cerca de 2 dias para a temperatura de 23°C.

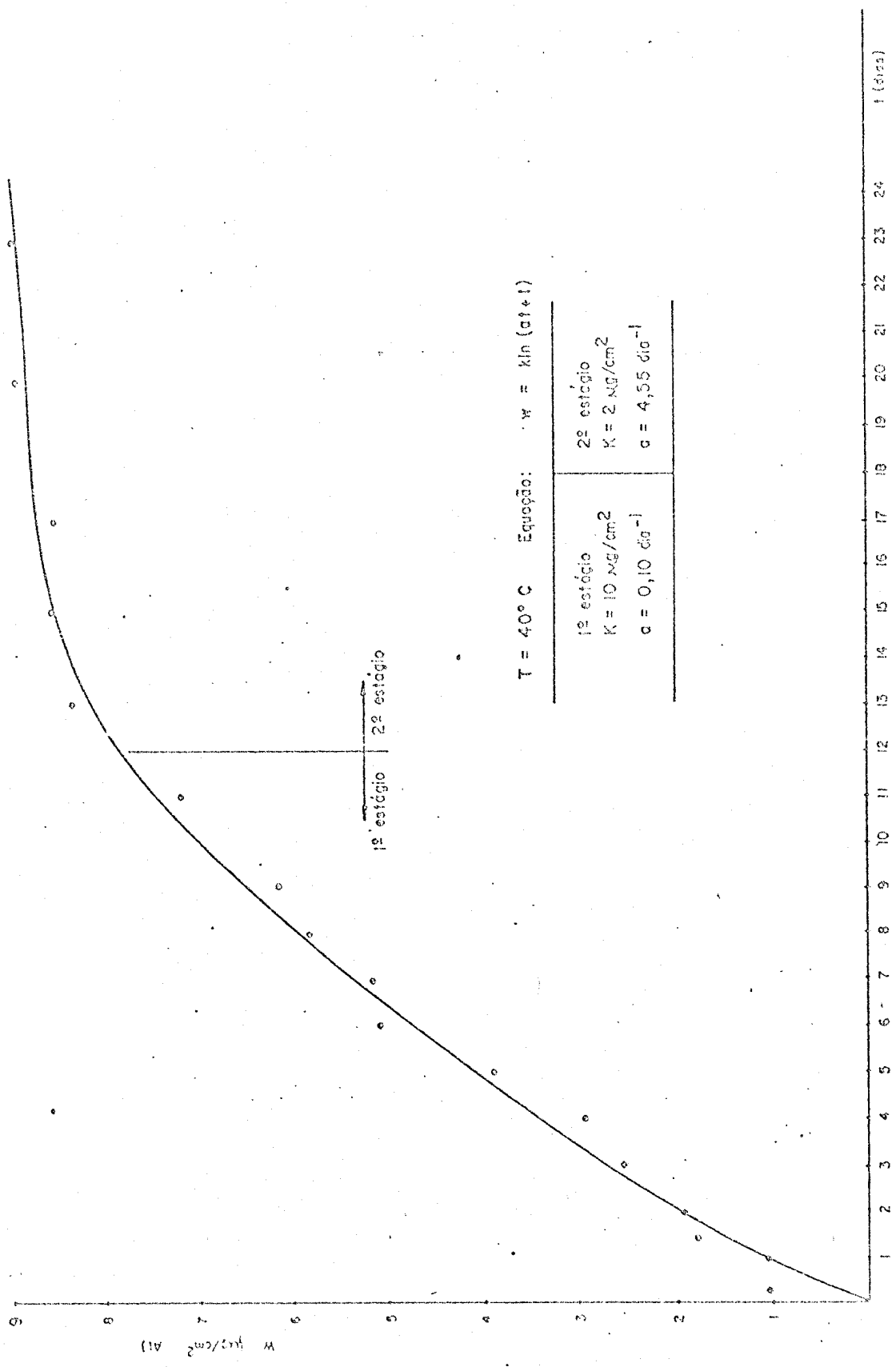


FIGURA 10 - CORROSÃO DE ALUMÍNIO AA-5052 EM ÁGUA DEIONIZADA E TEMPERATURA DE 40°C

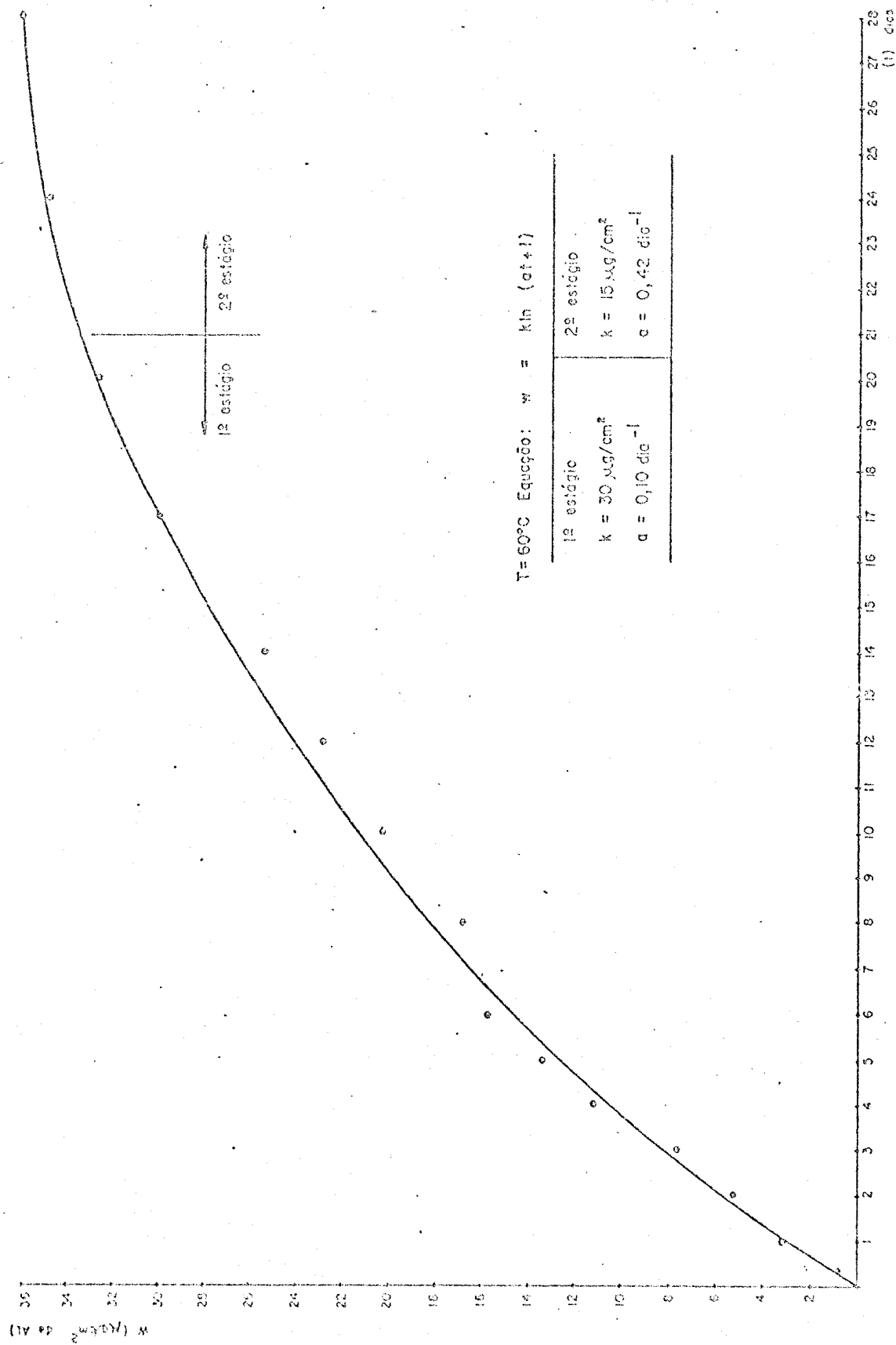
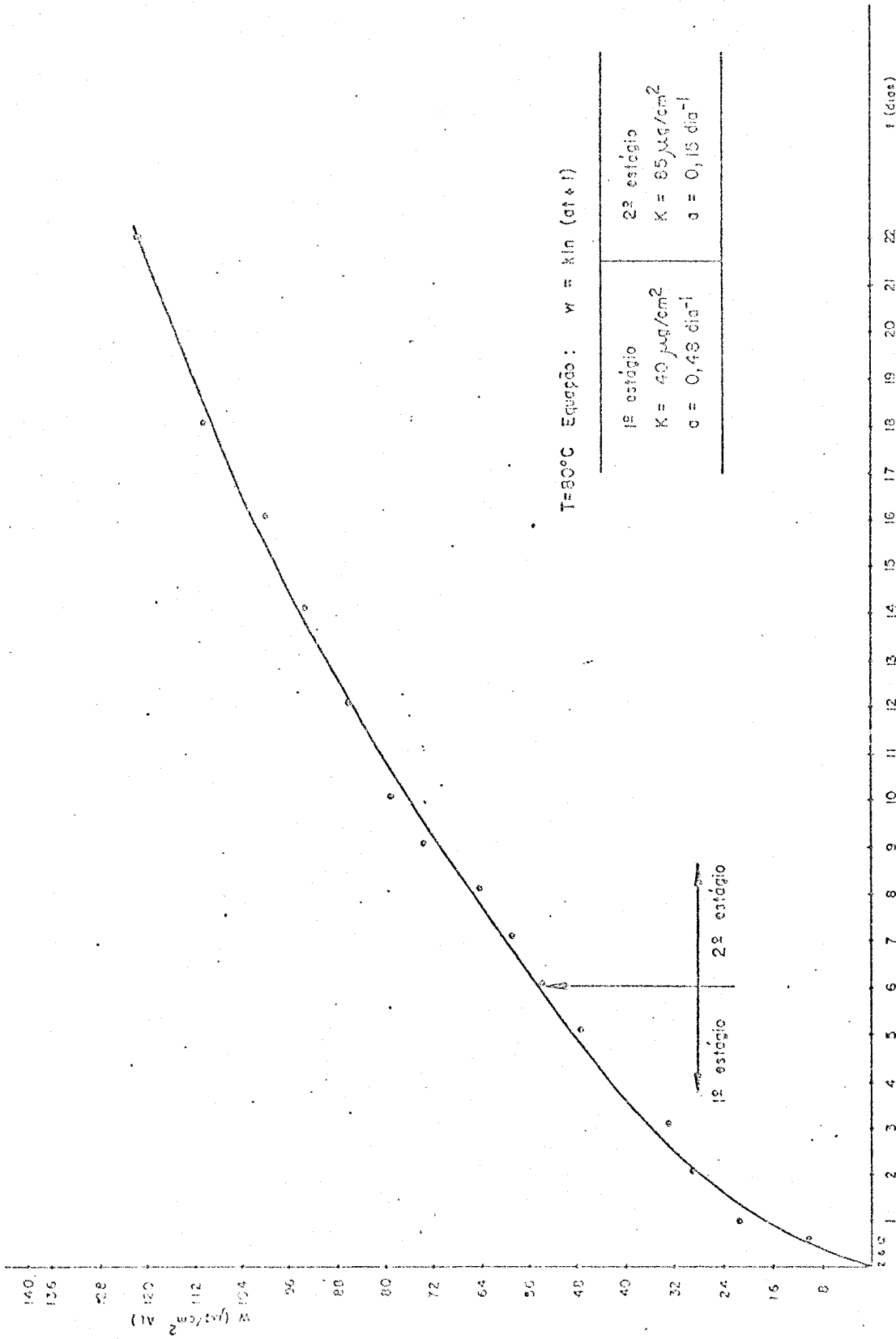


FIGURA 11 -- CORROSÃO DE ALUMÍNIO AA-5052 EM ÁGUA DEIONIZADA E TEMPERATURA DE 60°C



$T=80^\circ\text{C}$  Equação:  $w = \ln(a(1-t))$

FIGURA 12 - CORROSÃO DE ALUMÍNIO AA-5052 EM ÁGUA DEIONIZADA E TEMPERATURA DE 80°C

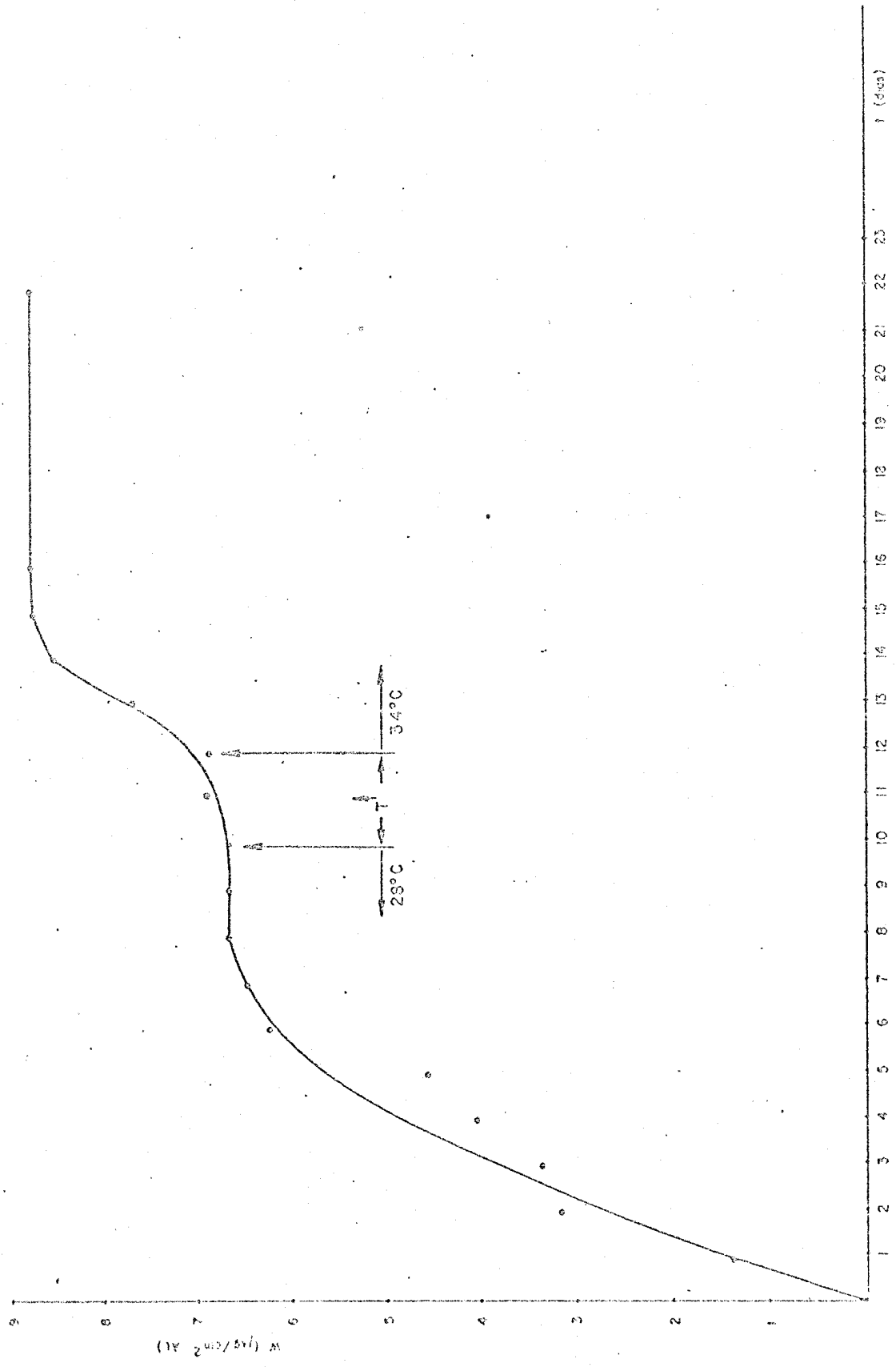


FIGURA 13 - CORROSÃO DE ALUMÍNIO AA-5052 em ÁGUA DEIONIZADA E TEMPERATURA VARIÁVEL

2. Um aumento imediato na taxa de corrosão quando se eleva a temperatura de 28°C para 34°C.
3. Rápida saturação (cerca de 3 dias) na temperatura de 34°C após a elevação de temperatura de 28 para 34°C.

### 3.3. Discussão

Estudos de corrosão efetuados na liga de alumínio AA1100 (Al 99,5%) em temperaturas inferiores a 100°C mostram o mesmo comportamento, quanto à corrosão, que a liga AA5052 /29/. KAWASAKI et alii /37/ estudando a corrosão da liga AA1100 em água deionizada e fluxada durante os ensaios, em temperaturas inferiores a 100°C, obtiveram as curvas de corrosão ilustradas na figura 14. Observa-se o mesmo comportamento das curvas de metal dissolvido na água, e de metal corroído e formando o filme de corrosão da superfície. Este comportamento foi observado para as diferentes temperaturas estudadas (50°C e 70°C) e condições diferentes de fluxo de água. É de se esperar que para a liga AA5052 o comportamento das curvas de corrosão, considerando-se a dissolução do metal na água e o crescimento do filme de corrosão, seja o mesmo, embora com valores diferentes.

No presente trabalho foi estudada apenas a taxa de dissolução do metal na água, supondo o mesmo comportamento para a taxa de crescimento do filme na superfície da amostra. Desta maneira supõe-se que a equação da curva que descreve a dissolução do metal na água, é semelhante à equação que descreve o crescimento do filme na superfície da amostra.

A equação da curva de corrosão, para todas as temperaturas estudadas, foi uma equação logarítmica descrita por:



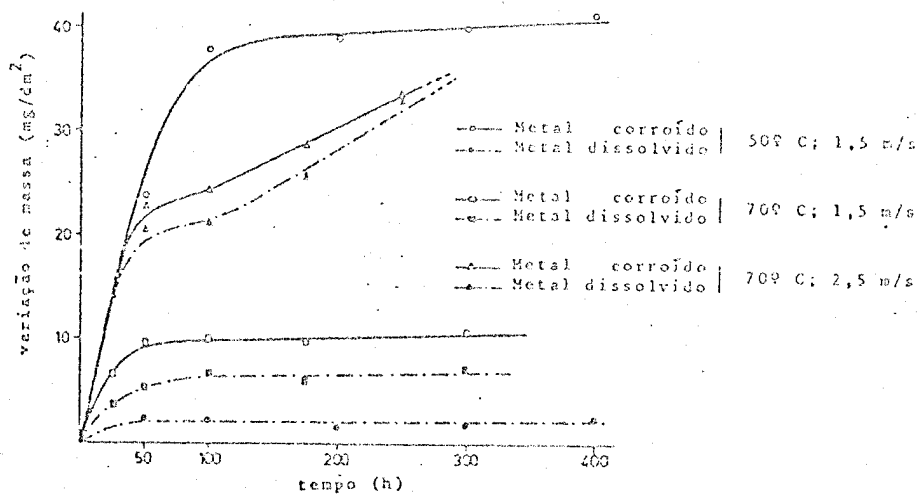


FIGURA 14 - CORROSÃO DE ALUMÍNIO AA-1100 EM ÁGUA CORRENTE (cf. KAWASAKI et alii /37/).

$$W = k \ln(at + 1) \quad /41-42/$$

onde,

W; quantidade total de alumínio dissolvido ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).

k; constante que depende da temperatura e do coeficiente de difusão.

a; constante de tempo ( $t^{-1}$ )

t; tempo de exposição.

Para a temperatura de 40°C a curva de corrosão é descrita por 2 estágios (Figura 10). No 1º estágio, que vai até o 12º dia de exposição, a taxa de corrosão é mais elevada. No 2º estágio, do 12º dia em diante de exposição, a taxa de corrosão é menor. Observa-se que a curva tende para saturação, com a taxa de corrosão caindo a zero.

No 1º estágio a curva de corrosão é descrita por valores de  $k = 10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  e  $a = 0,10 \text{ dia}^{-1}$ ; no 2º estágio  $k = 2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  e  $a = 4,55 \text{ dia}^{-1}$ .

Tem-se pois,

$$1^\circ \text{ estágio: } W = 10 \ln(0,10t + 1)$$

$$2^\circ \text{ estágio: } W = 2 \ln(4,55t + 1)$$

Para a temperatura de 60°C a curva de corrosão é descrita também por 2 estágios (Figura 11). O comportamento da curva é semelhante ao caso anterior, onde o 1º estágio da curva vai até o 21º dia de exposição. A taxa de corrosão no 1º estágio é mais elevada. No 2º estágio, do 21º dia de exposição em diante, a taxa de corrosão é menor e tende à saturação. No 1º estágio a curva de corrosão é descrita por valores de  $k = 30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  e

$a = 0,10 \text{ dia}^{-1}$ ; no 2º estágio  $k = 15 \text{ } \mu\text{g}/\text{cm}^2$  e  
 $a = 0,42 \text{ dia}^{-1}$ . As equações são

$$1^\circ \text{ estágio: } W = 30 \ln(0,10t + 1)$$

$$2^\circ \text{ estágio: } W = 15 \ln(0,42t + 1)$$

Para a temperatura de 80°C o comportamento da curva de corrosão é semelhante aos dois casos anteriores (Figura 12). Existem dois estágios, sendo que o 1º estágio vai até o 6º dia de exposição e o 2º estágio do 6º dia em diante. Também nesta temperatura a curva tende para saturação no 2º estágio, mas num tempo mais longo de exposição. No 1º estágio a curva de corrosão é descrita por valores de  $k = 40 \text{ } \mu\text{g}/\text{cm}^2$  e  $a = 0,48 \text{ dia}^{-1}$ ; no 2º estágio  $k = 85 \text{ } \mu\text{g}/\text{cm}^2$  e  $a = 0,15 \text{ dia}^{-1}$ . As equações são

$$1^\circ \text{ estágio: } W = 40 \ln(0,48t + 1)$$

$$2^\circ \text{ estágio: } W = 85 \ln(0,15t + 1)$$

Os resultados aqui apresentados estão de acordo com os resultados descritos por KAWASAKI et alii /37/ para corrosão aquosa de alumínio 99,99% em condições experimentais próximas das descritas neste trabalho. Isto pode ser verificado locando-se os valores obtidos nas figuras 10, 11 e 12 em um gráfico semi-logarítmico (Figuras 15, 16 e 17) e comparando-se as formas das curvas com as da figura 18 para as temperaturas de 52,0°C, 59,5°C e 81,2°C. Verifica-se também que os valores quantitativos para a taxa de corrosão da liga AA5052 são menores que os do alumínio 99,99%. Isto é de se esperar já que a liga AA5052 é mais resistente à corrosão aquosa do que o alumínio puro.

O comportamento da curva de corrosão descrita na figura 13, onde a temperatura varia durante o ensaio

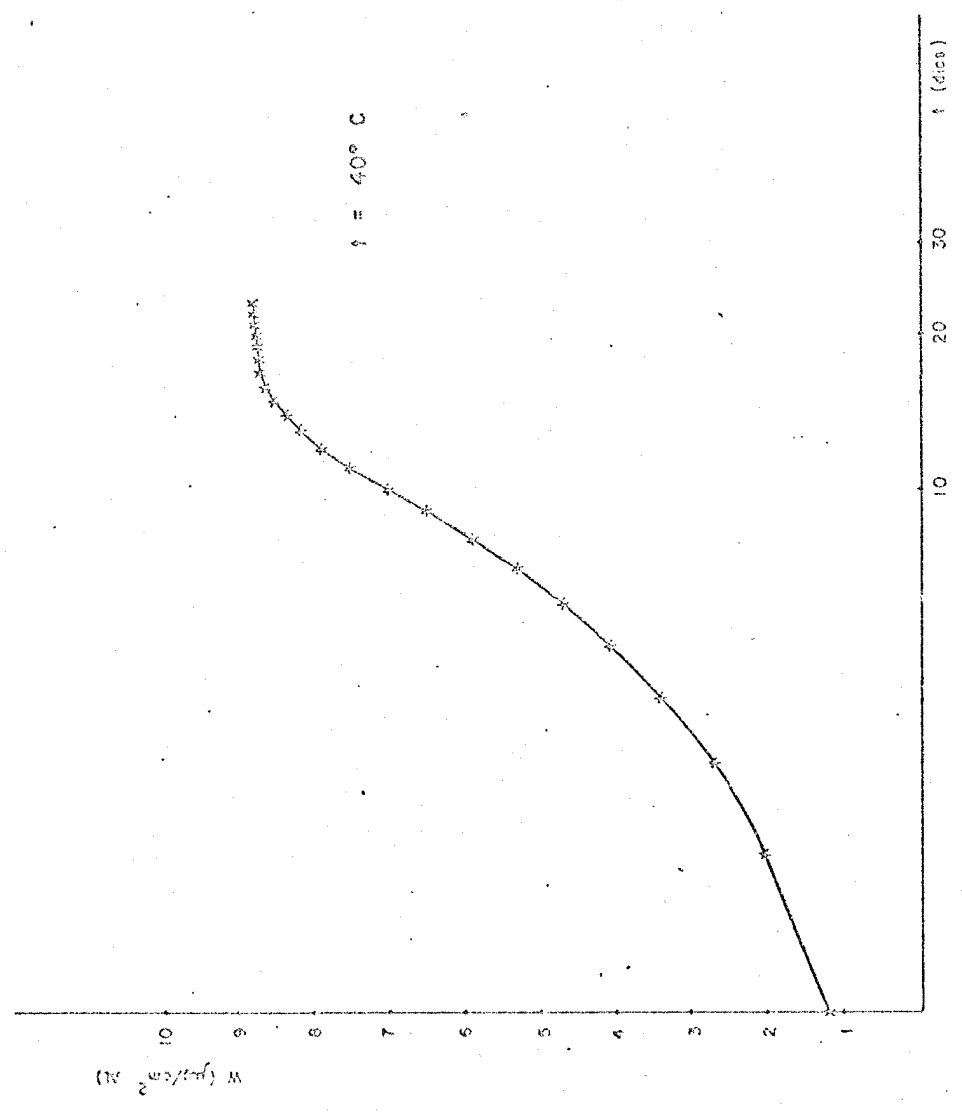


FIGURA 15 - CORROSÃO DE ALUMÍNIO AA-5052 EM ÁGUA DEIONIZADA E  
TEMPERATURA DE 40°C

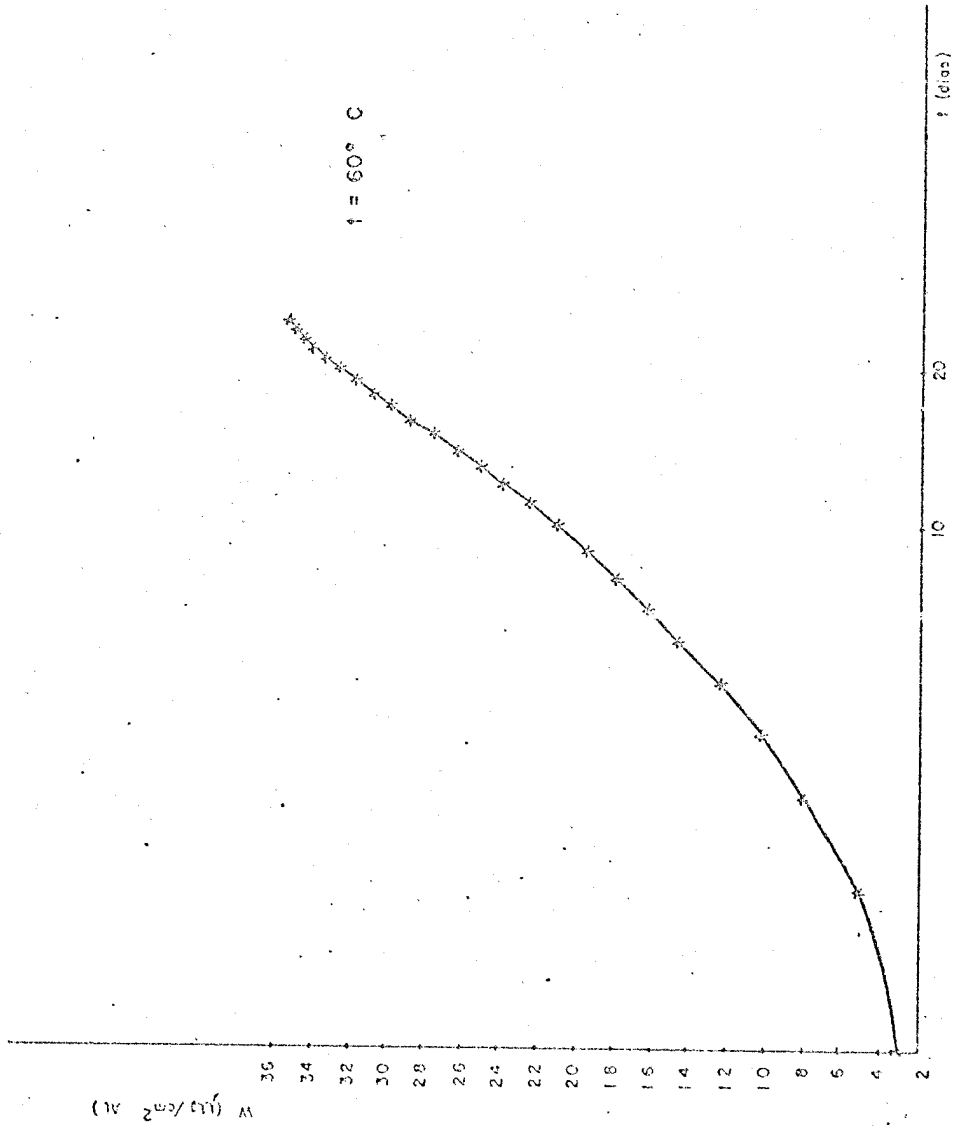


FIGURA 16 - CORROSÃO DE ALUMÍNIO AA-5052 EM ÁGUA DEIONIZADA E TEMPERATURA DE 60°C

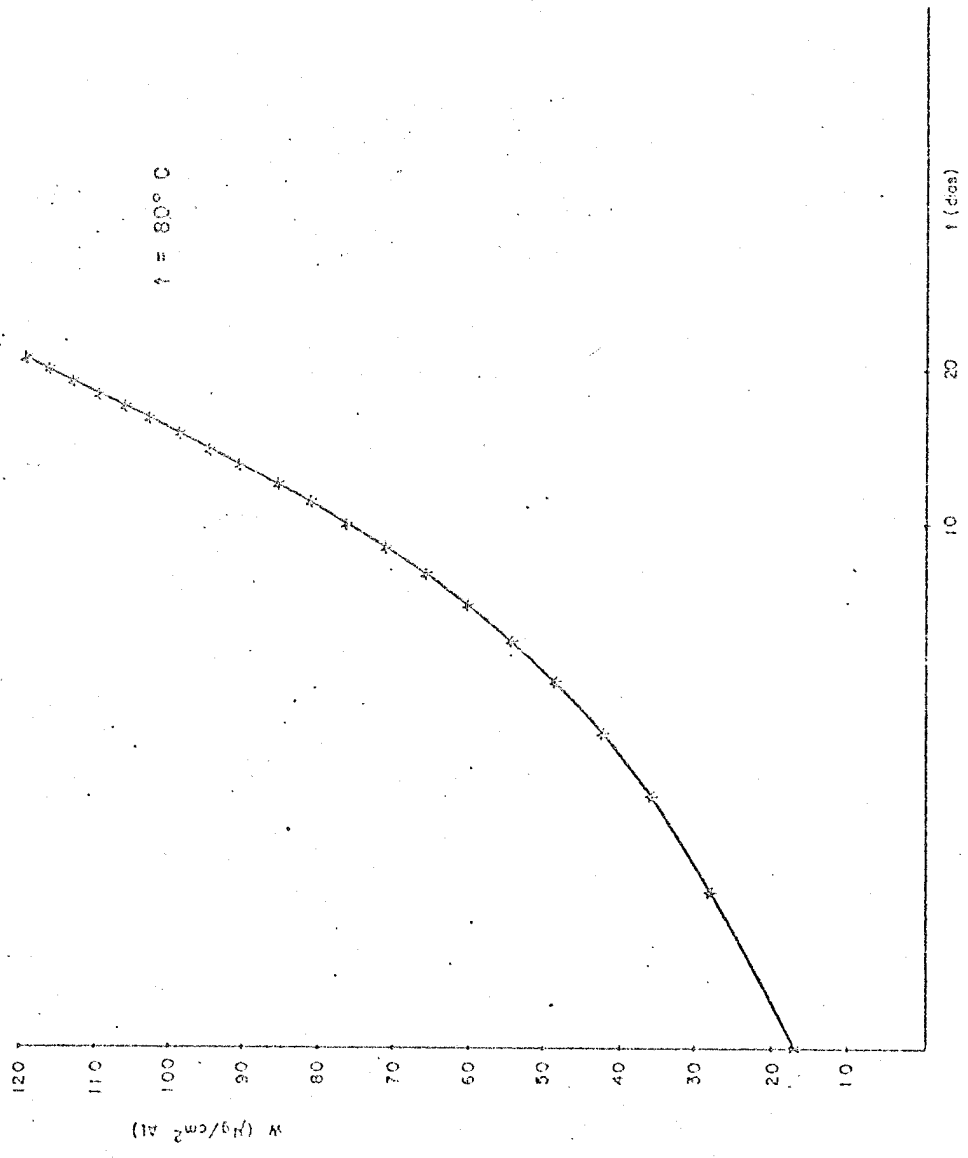


FIGURA 17 - CORROSÃO DE ALUMÍNIO AA-5052 EM ÁGUA DEIONIZADA E TEMPERATURA DE 80°C

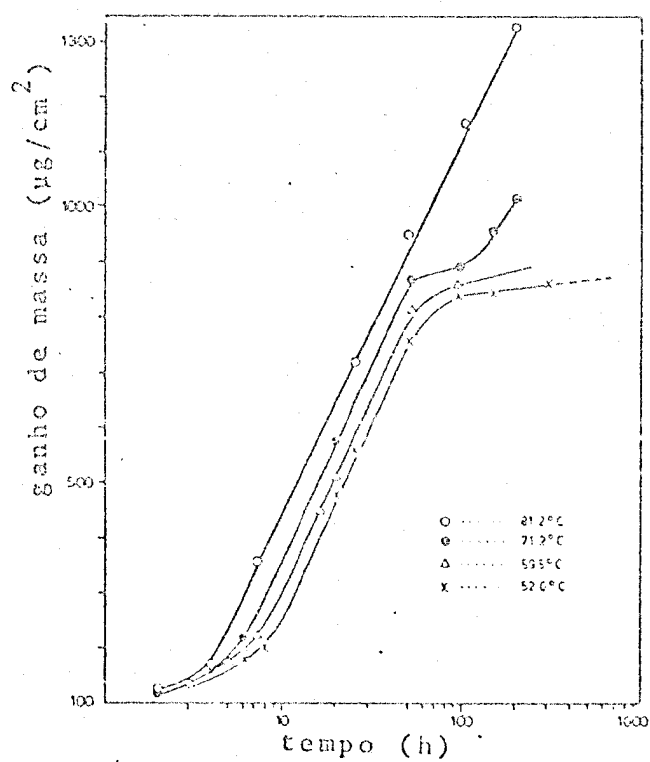


FIGURA 18 - CORROSÃO DE ALUMÍNIO (99,99%) EM ÁGUA  
(Cf. KAWASAKI et alii /37/)

Foram realizados exames por difração de raios-X em condições normais e de varredura lenta (Step Scanning). Não foram encontradas as raia típicas dos compostos boehmita e bayerita, e pelos exames efetuados, o filme formado em todas as amostras seria óxido de alumínio amorfo. Isto está em contradição com o que geralmente é descrito na Literatura e merece uma posterior investigação, pois os resultados apresentados na Literatura não se referem a liga AA-5052 estudada neste trabalho.

As irregularidades observadas em alguns pontos do filme de corrosão, através de exames por micro-sonda eletrônica (vide figuras 7,8 e 9) parecem ser originadas de defeitos superficiais já existentes nas amostras, ou pela evolução de hidrogênio /4 6/, possivelmente introduzido durante a limpeza da amostra antes da imersão. O aspecto dessas irregularidades sugere o arrebetamento do filme, em alguns pontos, por pressão interna de gás. No entanto, essas irregularidades parecem não ter tido influência nas curvas de corrosão descritas nas figuras 10,11,12 e 13, e possivelmente outra camada de filme teria sido formado no local de arrebetamento.

#### 3.4. Conclusões

Considerando-se as equações de corrosão da liga de alumínio AA5052, aqui estudadas, e as condições atuais de pureza da água de refrigeração, pode-se estimar para a corrosão no tanque do reator IPR-R1 como sendo:



Temperatura (°C)	Taxa de dissolução (µg/cm <sup>2</sup> . ano)
40	0,9
60	11
80	54

Estes valores são muito baixos, mesmo considerando um super aquecimento na água de refrigeração (80°C), e pode-se prever não haver problemas de corrosão a longo prazo.

Outros tipos de corrosão, como "pitting", corrosão sob tensão, e corrosão galvânica, que poderiam modificar os valores encontrados acima, são pouco viáveis ocorrer neste caso:

- . Não foi observado "pitting" nas experiências realizadas e segundo HART /43/, este tipo de corrosão não é normal no alumínio.
- . No caso de corrosão sob tensão, este tipo de corrosão poderia ocorrer nas juntas soldadas. No entanto, ensaios realizados em amostras soldadas (vide item 2.2.5.), nas condições de soldagem descritas no cap. 2, constataram uma taxa de corrosão pouco superior à da liga.
- . Corrosão galvânica não será possível pelas condições de projeto do tanque, em que o tanque não deverá ter contato com outro tipo de material.

Efeitos de irradiação, que poderiam acelerar a taxa de corrosão, também é desprezível neste caso, como será visto no capítulo seguinte.

#### 4. EFEITOS DE RADIAÇÃO NO ALUMÍNIO

O tanque após colocado no poço, estando o reator em funcionamento, ficará num ambiente de radiação que poderia afetar as propriedades físicas, mecânicas e de corrosão da liga.

No presente caso, somente os nêutrons tem interesse para estudo de danos de irradiação na liga já que o tanque estará blindado com água e, conseqüentemente, contra as partículas alfa e beta. As outras radiações, tais como prótons, gama e produtos de fissão não tem também interesse neste caso, podendo ser desprezadas /47-48-49/.

O IPR-R1 sendo um reator de pesquisa de pequeno porte, tem fluxos de nêutrons rápidos baixos, da ordem de  $1,4 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>.s no tubo central e  $4,7 \times 10^{10}$  n/cm<sup>2</sup>.s na mesa giratória. Para nêutrons térmicos, os valores são  $4,0 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>.s e  $6,6 \times 10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>.s no tubo central e mesa giratória, respectivamente, valores estes na potência de 100 Kw.

Junto da parede do poço, o fluxo de nêutrons rápidos pode ser desprezado devido à termalização pela água. Para nêutrons térmicos o fluxo é da ordem de  $1,3 \times 10^8$  n/cm<sup>2</sup>.s para potência de 100 Kw. Se for extrapolado este valor para potências maiores (por exemplo, 250 Kw) tem-se  $2,9 \times 10^8$  n/cm<sup>2</sup>.s.

No caso do alumínio, os efeitos nas propriedades físicas e mecânicas já foram bastante estudadas, mostrando que os efeitos só aparecem numa escala apreciável, a uma alta dose de nêutrons rápidos, da ordem de

5 a  $10 \times 10^{20}$  n/cm<sup>2</sup> /50-51-52-53-54-55/.

A tabela 7 ilustra valores obtidos na literatura de propriedades mecânicas para a liga AA-5052, irradiada à várias temperaturas.

No presente caso, sendo o fluxo baixo e como os efeitos da irradiação no alumínio são recozidos já em temperaturas baixas, inclusive abaixo da temperatura ambiente /48-51-52-55/, os efeitos serão desprezíveis.

Quanto à corrosão, para o alumínio e suas ligas, à baixa temperatura, a taxa de corrosão praticamente não se altera com o efeito da radiação /28-33-52-56/. Pode-se, neste caso, prever-se um efeito desprezível na taxa de corrosão no tanque do reator IPR-R1.

Para verificação de possíveis efeitos de radiação na liga, amostras foram irradiadas no reator IPR-R1 durante um período de 15 meses a um fluxo de  $1,4 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>.s ( $E_n > 1$  Mev) no tubo central (dose integrada de  $2 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>). Em seguida, as amostras foram analisadas por difração de raios-X em um aparelho marca Rigaku-Denki, modelo gengerflex 2032. Observou-se que não houve alargamento nas raias do alumínio irradiado, comparando-se com alumínio não-irradiado, indicando que possivelmente não houve mudança na rede cristalina da liga, como era esperado. Inspeção visual das amostras não mostraram mudança na coloração indicando que não houve problemas de corrosão.

Portanto, devido a dose integrada no tanque colocado no poço ser baixo, conclui-se não haver problemas quanto aos efeitos da radiação.

TABELA 7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA AA-5052 IRRADIADA

LIGA	TEMPERA	CONDIÇÕES DE IRRADIÇÃO		ENERGIA (meV)	LIMITE ESCOAMENTO (psix10 <sup>3</sup> )		LIMITE RUPTURA (psix10 <sup>3</sup> )		ALONGAMENTO (s em 50mm)			REFEREN CIA		
		%	Dose neutron/cm <sup>2</sup>		NI*	I**	Δ	NI	I	Δ	NI		I	Δ
5052	0	65	1x10 <sup>20</sup>	>1	14,7	27,9	13,2	29,2	37,4	8,2	34,0	30,6	-3,4	65
5052	H-34	65	1x10 <sup>20</sup>	>1	29,5	36,4	6,9	36,0	44,7	8,7	11,2	14,0	+2,8	65
5052	0	50	2x10 <sup>20</sup>	>1	11,2	13,4	2,2	28,7	31,8	3,1	32,0	32,0	0	65
5052	0	150	1x10 <sup>20</sup>	>1	14,7	22,9	8,2	29,2	37,4	8,2	34,0	30,5	-3,5	68
5052	H-34	150	1x10 <sup>20</sup>	>1	29,5	36,4	6,9	36,0	44,7	8,7	11,0	14,0	+3,0	68

\* Não irradiada

\*\* Irradiada

## 5. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Uma estimativa feita para o funcionamento do reator em 250 Kw, mostra que a taxa de exposição no topo do reator é de ~ 55 mR/h, estimativa esta dentro dos padrões normais de segurança radiológica /57/.

O objetivo deste capítulo é estudar se o tanque colocado no poço e sujeito à irradiação influirá neste nível, acarretando a necessidade de se colocar ou não uma cobertura no topo do reator.

### 5.1. Atividade induzida do tanque

#### 5.1.1. Considerações iniciais

Para o cálculo vários casos foram considerados.

1. Atividades para 5 horas de irradiação durante 1 dia a potências de 100 e 250 Kw.
2. Atividades para 5 horas de irradiação durante 240 dias a potências de 100 e 250 Kw.
3. Atividades para 5 horas de irradiação durante 2400 dias a potências de 100 e 250 Kw.

Estes casos foram definidos levando-se em conta o esquema atual de operação do reator. Nos casos 2 e 3 as atividades são equivalentes a 1 e 10 anos de operação.

Quanto ao fluxo de nêutrons térmicos envolvidos, foi considerado o fluxo máximo obtido na figura 19 que mostra a distribuição de nêutrons térmicos na parede do poço, ou seja,  $1,3 \cdot 10^8$  n/cm<sup>2</sup>.s. Nota-se que isto é uma situação mais crítica porque, na realidade, a ativação do tanque será diferente em relação à altura.

A partir desta mesma figura definiu-se a altura do tanque que estará sujeito a irradiação como 150cm. Sendo o diâmetro do tanque de 194 cm, e espessura de parede 1,0 cm, resulta uma massa envolvida na radiação da ordem de 330 Kg (chapa lateral e chapa do fundo).

De posse da composição química da liga, dada no apêndice 2 calculou-se a quantidade de cada elemento presente. Na tabela 8 tem-se o resultado:

Tabela 8 - Massa dos elementos presentes na liga AA-5052

ELEMENTO	MASSA (g.10 <sup>2</sup> )
Alumínio	3.200,0
Ferro	7,6
Silício	4,6
Cobre	0,4
Manganês	0,7
Magnésio	70,0
Cromo	7,0
Chumbo	0,8
Titânio	1,3
Zinco	0,3

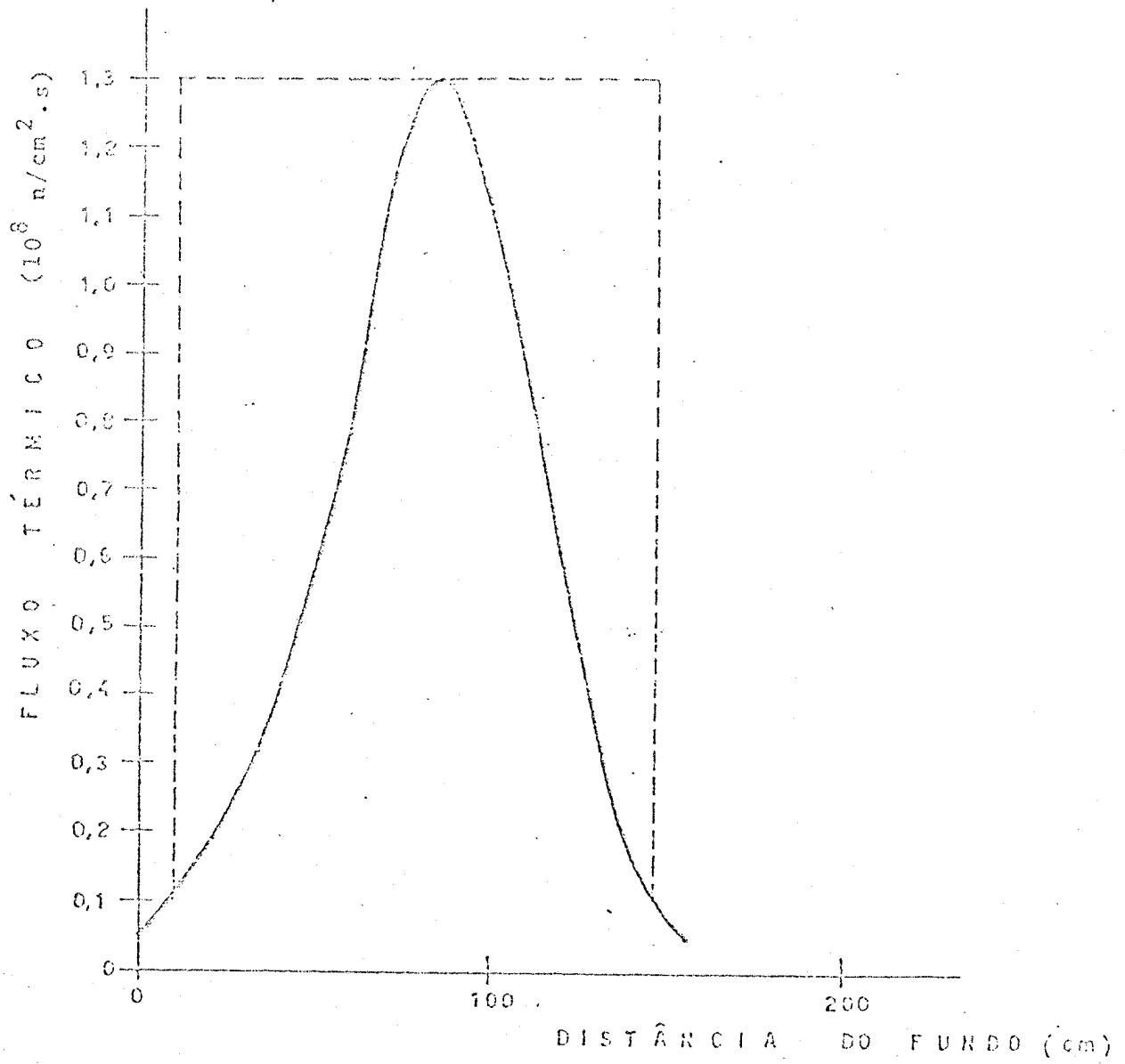


FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO TÉRMICO NA PAREDE DO POÇO (Cf. RODRIGUES, C. W. /57/)

## 5.1.2. Cálculo das atividades

Utilizou-se no cálculo a seguinte fórmula/57/:

$$A_n = A_s \cdot m(1 - e^{-\lambda t_i}) \cdot \frac{1 - e^{-n\lambda t_d}}{1 - e^{-\lambda t_d}}$$

$A_n$  = atividade após n ciclos (mCi)

$A_s$  = atividade específica de saturação no fluxo de  
 $1,3 \cdot 10^8$  n/cm<sup>2</sup>.s (mCi)

m = massa do isótopo alvo, (g)

n = número de ciclos (1,240 e 2.400 dias)

$t_i$  = tempo de irradiação

$t_d$  = período do ciclo (24 horas)

$\lambda$  = constante de desintegração =  $\frac{0,693}{t_{\frac{1}{2}}}$

$t_{\frac{1}{2}}$  = meia-vida do isótopo formado

Desta maneira calculou-se as atividades dos vários isótopos formados. Na tabela 9 apresenta-se as atividades dos isótopos de maior interesse para os três casos.



TABELA 9 - ATIVIDADES INDUZIDAS NO TANQUE

ISÓTOPO	$t_{\frac{1}{2}}$	ATIVIDADE (mCi)								
		1º caso			2º caso			3º caso		
		$t_i=5h;$ 100 Kw	$n = 1 d$ 250 Kw	$t_i=5h;$ 100 Kw	$t_i=5h;$ 100 Kw	$n = 240 d$ 250 Kw	$t_i=5h;$ 100 Kw	$n = 2.400 d$ 250 Kw	$t_i=5h;$ 100 Kw	$n = 2.400 d$ 250 Kw
Mg <sup>27</sup>	9,7 min	2,0	5,0	2,0	2,0	5,0	2,0	5,0	2,0	5,0
Al <sup>28</sup>	2,3 min	5,4.10 <sup>3</sup>	1,4.10 <sup>4</sup>	5,4.10 <sup>3</sup>	5,4.10 <sup>3</sup>	1,4.10 <sup>4</sup>	5,4.10 <sup>3</sup>	1,4.10 <sup>4</sup>	5,4.10 <sup>3</sup>	1,4.10 <sup>4</sup>
Cr <sup>51</sup>	27 d	-	-	3,0	3,0	8,0	3,0	8,0	3,0	8,0
Fe <sup>55</sup>	2,9 a	-	-	-	-	-	1,0	3,0	1,0	3,0
Mn <sup>56</sup>	2,6h	26,0	65,0	26,0	26,0	65,0	26,0	65,0	26,0	65,0
Fe <sup>59</sup>	45 d	-	-	3,0	3,0	7,0	3,0	7,0	3,0	7,0
Cu <sup>64</sup>	12,8 h	-	3,0	2,0	2,0	4,0	2,0	4,0	2,0	4,0
Zn <sup>65</sup>	245 d	-	-	-	-	-	1,0	2,0	1,0	2,0
Cu <sup>66</sup>	5,1 min	1,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	2,0

## 5.2. Taxa de exposição no topo do reator

Na figura 20 tem-se o tanque dentro do poço. Num cálculo pessimista, considerando-se o fluxo uniforme de  $1,3 \times 10^6$  n/cm<sup>2</sup>.s (item 5.1) ao longo do tanque de 150 cm de altura, resulta a atividade calculada em 5.1, que está pois distribuída uniformemente ao longo deste tanque. Esta atividade está blindada, de um lado, pela água do poço, e de outro pela parede.

Para efeito de cálculo, considerou-se que a atividade calculada em 5.1 está toda concentrada num disco fino, sólido de diâmetro 194 cm e colocado numa altura de 150 cm (vide figura 20). Esta suposição é válida já que o volume da parede lateral do tanque para o volume da chapa do fundo está numa relação de 3, ou seja, o disco terá então, ~3 cm. Esta espessura é fina comparando-se com a altura total do tanque (~641,7 cm). Quanto à altura que está colocado o disco vê-se que é uma situação pessimista já que a atividade estará mais próxima do topo do reator.

No topo do reator a taxa de exposição será devida somente aos gama, já que os nêutrons serão blindados pela água. Assim, de acordo com /47-53/ a taxa devida aos gamas num ponto P de uma fonte em forma de disco é dada por:

$$\dot{D} (\text{ponto P}) = \frac{1}{2} S_a \left\{ E_1(\mu t) - E_1 \left[ \mu t \left( 1 + \frac{a^2}{z^2} \right) \frac{1}{2} \right] \right\}$$

onde,

$S_a$ : intensidade da fonte (meV/cm<sup>2</sup>.s)

$\mu$ : coeficiente de atenuação linear da blindagem (cm<sup>-1</sup>)

t: espessura da blindagem (cm)

a: raio da fonte (cm)

z: distância do ponto p à fonte (cm)

$E_1(\mu t)$ : função integral de 1ª ordem (Figura 21)

Como o raio a da fonte é muito grande, a expressão pode ser simplificada para:

$$\phi \text{ (ponto P)} = \frac{1}{2} S_a E_1(\mu t) \quad /47-58/$$

$$\text{Sendo } S_a = 3,7 \times 10^{10} \frac{\Lambda_F}{\Lambda_{sd}} \cdot E_Y \text{ meV/cm}^2 \cdot \text{s}$$

onde

$\Lambda_F$ : atividade da fonte = 14 Ci (atividade devida ao Al<sup>28</sup> já que as outras atividades são desprezíveis (Tabela 9)).

$\Lambda_{sd}$ : área do disco =  $3,0 \times 10^4 \text{ cm}^2$

$E_Y$ : energia máxima da radiação gama, devido ao Al<sup>28</sup> = 1,78 meV.

tem-se  $S_a = 3,0 \times 10^7 \text{ meV/cm}^2 \cdot \text{s}$

Como  $\mu$  da água é 0,052 /59/ e a espessura de blindagem t da água é 450 cm, pela Figura 21 calcula-se  $E_1(\mu t)$  como sendo  $3,0 \times 10^{-11}$ .

Voltando agora a expressão  $\phi = \frac{1}{2} S_a E_1(\mu t)$  o valor da taxa no topo será de  $1,2 \times 10^{-3} \text{ meV/cm}^2 \cdot \text{s}$ .

De acordo com a Figura 22 tem-se que, para uma energia de 1,78 meV,  $6,0 \times 10^2 \text{ meV/cm}^2 \cdot \text{s}$  equivale a

1 mR/h. Então, para o fluxo calculado tem-se uma taxa de  $2,0 \times 10^{-6}$  mR/h.

Este valor é muito baixo, indicando que os níveis de radiação no topo do reator não serão afetados com a colocação do tanque.

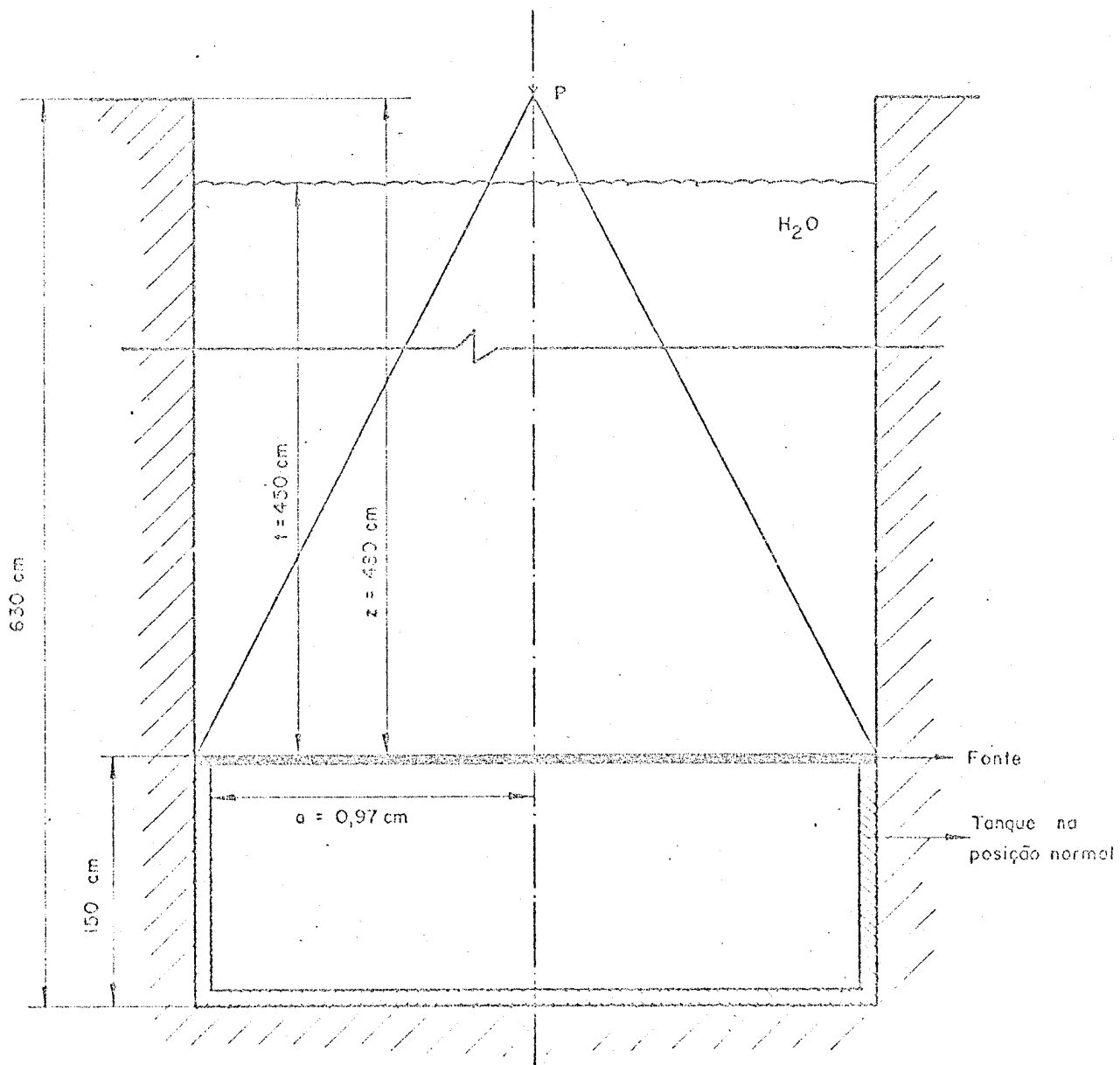


FIGURA 20 - ESQUEMA PARA CÁLCULO DA TAXA DE EXPOSIÇÃO NO TOPO DO REATOR

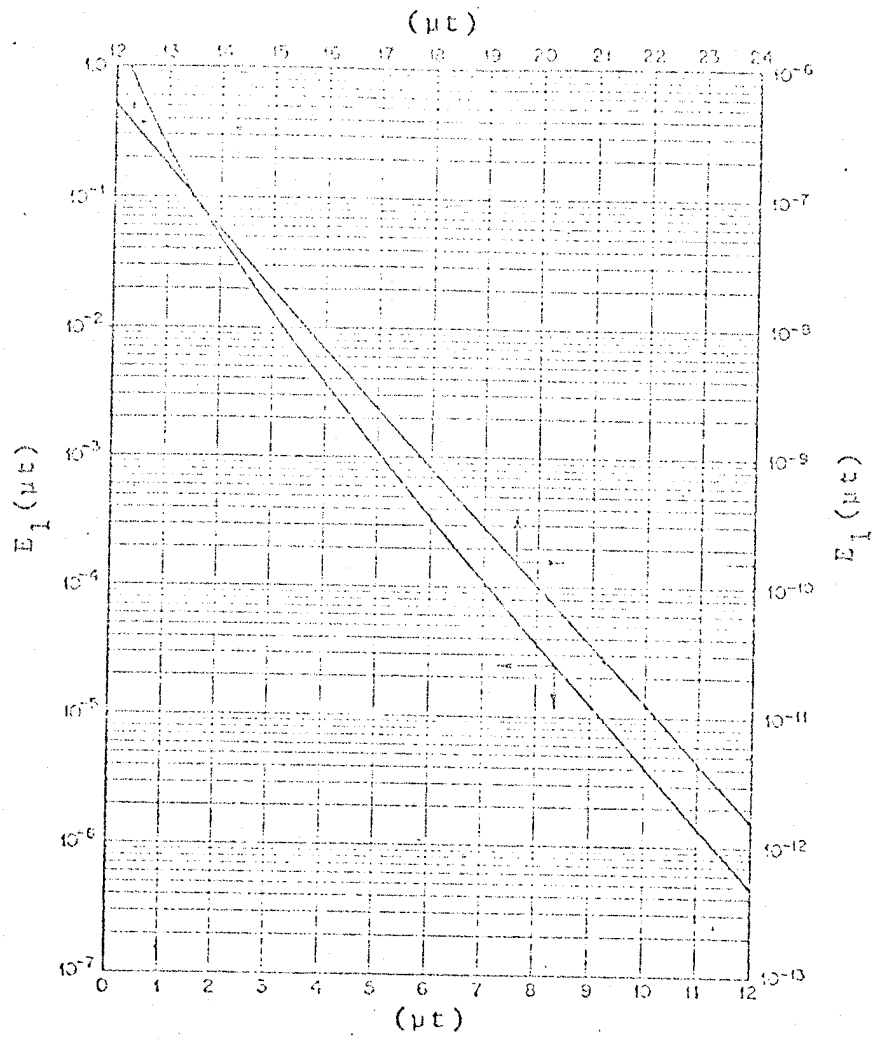


FIGURA 21 - FUNÇÃO INTEGRAL DE 1.<sup>a</sup> ORDEM  
(cf. GLASSTONE /47/)

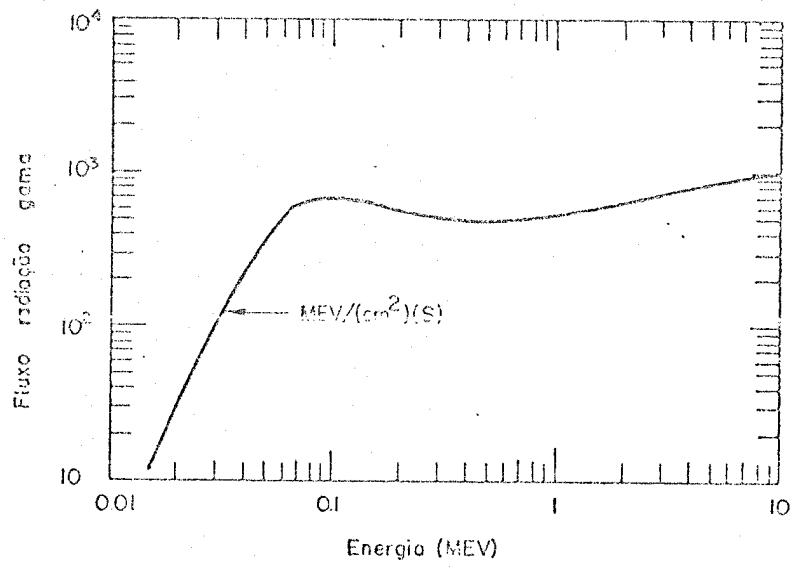


FIGURA 22 - FLUXO DE RADIAÇÃO GAMA EM FUNÇÃO DA ENERGIA (Cf. GLASSTONE /47/)

## 6. CONCLUSÕES

Como resultado dos estudos realizados pode-se concluir:

1. Para soldagem do tanque sugere-se o processo TIG por ser o mais adequado. Como material de enchimento, sugere-se vareta de enchimento com teor de Magnésio igual ou maior que 2,5%. Para eletrodo recomenda-se o uso do eletrodo de tungstênio zirconado ou como opção o tungstênio torinado. Sugere-se também os parâmetros de soldagem indicados na tabela 2, assim como os procedimentos mostrados no item 2.1.

2. A utilização do método de análise por ativação no estudo de corrosão da liga, mostrou-se simples, rápido e preciso. Nos ensaios realizados, a liga do tanque AA-5052, mostrou-se resistente à corrosão, podendo prever-se não haver problemas ao longo da utilização do reator.

3. Com respeito aos efeitos de radiação no Alumínio não deverá ocorrer problemas, do mesmo modo quanto à segurança radiológica com a colocação do tanque no poço.



7. BIBLIOGRAFIA

- /1/ GENERAL ATOMIC. TRIGA Mark I reactor description. San Diego, Calif. 1959 (GA-952).
- /2/ ANDRADE E SILVA, V.M. Ante-Projeto da ampliação da potência do reator IPR-R1 para 250 Kw. Belo Horizonte, Instituto de Pesquisas Radioativas, 1970. (Tese de mestrado).
- /3/ BOLTAX, A. Nuclear materials. New York, Mc Graw-Hill, 1964.
- /4/ SMITH, C.O. Nuclear reactor materials. Reading, Addison-Wesley, 1967.
- /5/ MELLO, J.C. et alii. Introdução à geração núcleo elétrica. Belo Horizonte, Imprensa da UFMG, Instituto de Pesquisas Radioativas, 1968.
- /6/ EUA Atomic Energy Commission. Reactor handbook materials. New York, Mc Graw-Hill, 1971.
- /7/ GENERAL ATOMIC. Manufacturing specifications for TRIGA Mark I aluminum reactor tank. San Diego, 1962.
- /8/ GENERAL ATOMIC. Specifications for Mark I Aluminum tank. San Diego, 1966.

- /9/ AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and pressure vessel code. Section II. Materials specifications. Part B: Non ferrous. New York, 1971.
- /10/ PAU, G. & KERN, W. Improvements at the TRIGA Mark III Reactor FRN. European TRIGA Meeting. Otaniemi (Helsinki), Finland. 25-27 August, 1970.
- /11/ GODARD, H.P. et al . The corrosion of light metals. New York, J. Willey, 1967.
- /12/ AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and pressure vessel Code. Section VIII. Pressure vessel, Division 1. New York, 1971.
- /13/ LAVELLE, E.B. & DAVIS, F.W. Welding problems in nuclear construction. Vienna, IAEA, 1961 (Review Series, 20).
- /14/ BARRAND, P.M. & GADEAU, M.R. L'aluminium. Paris, Eyrolles, 1964, t. 2.
- /15/ AMERICAN WELDING SOCIETY. Aluminum and aluminum alloys. New York, AWS, 1967.
- /16/ AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding handbook, metals and weldability. New York, 1971, v. 4.
- /17/ BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Specifications for fusion welded pressure vessels for use in the chemical, petroleum and allied industries. Londres, 1965 (BS-1515 - parte 1).

- /18/ AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure vessel Code. Section IX. Welding Qualifications. New York, 1971.
- /19/ S.E.P.I. - Procédés de Soudures des Alliages Legers. Paris, 1961.
- /20/ SOCIÉTÉ DE SOUDURES CASTOLIN. Catálogo de procesos de soldagem de alumínio. s.n.t.
- /21/ BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Method of testing fusion welds in aluminum and aluminum alloys. London, 1962 (B.S. 3451).
- /22/ AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure vessel Code. Section II. Materials specifications. Part C: Welding rods, electrodes and Filler Metals. New York, 1971.
- /23/ SLAUGHTER, G.M. & CANONICO, D.A. Welding and Brazing Filler Metals. Nuclear Eng. Design, 17, (2): 191-2, 1971.
- /24/ COMPANHIA BRASILEIRA DE TECNOLOGIA NUCLEAR, Instituto de Pesquisas Radioativas. Laboratório de Análises Químicas. Boletim de análises nº 530. Belo Horizonte, 1973.
- /25/ LAC VU HONG. Controle radiográfico des solduras des plaques aluminium pour la phase entraine - ment du soudeur destiné à la fabrication du réservoir du reacteur dans le cadre du "Projeto Aumento de Potência". Belo Horizonte, CBTN-IPR, 1974 (CBTN-IPR-PCQ-01/74).

- /26/ BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Fusion Welded pressure vessel for General Purposes. Part. 3, London, 1965 (B.S. 1500).
- /27/ TENSION testing & metallic materials. Annual Book of ASTM Standards, 31:196-215, 1973. (ASTM-E3-69).
- /28/ CORIOU, H. Les problèmes de corrosion dans les piles piscines. Bull. Inf. Sci. tech., 35: 47-52, 1959.
- /29/ BLANCHET, J. Etude du comportement a la corrosion des Alliages legers dans le domaine nucleaire. Saclay, Centre d'Études Nucléaires de Saclay, 1969. (CEA-CONF-1377).
- /30/ ITO, G. La corrosion des metaux et alliages pour reacteurs nucléaires. Trad. M. Foucque. Paris, Commissariat à l'Énergie Atomique, 1957. (CEA-Tr-X-517).
- /31/ LIMA, F.W. Chemical Support and maintenance work in Light-water moderated Research Reactor. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, 1965 (IEA-119).
- /32/ HOBBS, R.R. Corrosion of aluminium in critical facilities and canals. In: AEROJET NUCLEAR COMPANY. Nuclear Technology Division annual progress report for period ending, June 30, 1971. Idaho Falls, Idaho, 1971. (ANCR-1016) p. 137 - 9.

- /33/ CORIOU, H. Les problemes de la corrosion aqueuse dans le domaine de l'energie nucleaire. Corrosion et Anticorrosion, 13 (2): 55-71, fév.-mars, 1965.
- /34/ BERRY, W.E. Corrosion in nuclear applications. New York, J. Wiley, 1971.
- /35/ GENERAL ATOMIC. Technical foundations of TRIGA. San Diego, 1958. (GA-471).
- /36/ NEUMAN, P.D. The corrosion of Al alloys in the Oak Ridge Research Reactors Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory, 1961. (ORNL-3151).
- /37/ KAWASAKI, M. et al. Work on Corrosion of aluminum in water at the Japan Atomic Energy Research Institute. In: CONFERENCE ON CORROSION OF REACTOR MATERIALS, Salsburg, 1962. Proceedings Vienna, IAEA, 1962. v. 1, p. 427-75.
- /38/ SANTOS, A.N. & CHAUSSON, Y. Corrosão e proteção na Subcrítica CAPITU. Belo Horizonte. Instituto de Pesquisas Radioativas, 1972 (IPR-DCM-NI-38).
- /39/ LAB. ANÁLISES QUÍMICAS. IPR-CBTN. Boletins de análise de água do reator nos anos de 1973 e 1974.
- /40/ LAB. ANÁLISES QUÍMICAS. IPR-CBTN. Boletim de Análise nº 912, 1973.
- /41/ EVANS, U.R. The corrosion and oxidation of metals: Scientific principles and practical applications. London, Edward Arnold, 1960.

- /42/ CABRERA, H. & MOTT, N.F. Theory of the oxidation of Metals In: Reports on Progress in Physics., 12: 163-184, 1948/1949.
- /43/ HART, R.K. The formation of films on aluminum immersed in water. Transactions Faraday Soc. 53: 1020-7, 1957.
- /44/ ALWITT, S., ARCHIBALD, L.C. Some observation on the Hydrous oxide film on Aluminum immersed in warm water. Corrosion Science, 13:687-8, 1973.
- /45/ DRALEY, J.E. & MORI, S. & LOESS, R.E. The corrosion of 1100 Aluminum in Oxygen-Saturated water at 70°C. J. Electrochemical Soc., 110 (6): 622-7, Jun. 1963.
- /46/ MORI, S. & LOESS, R.E. Mechanism of anodic corrosion of 1100 Aluminum. In: ARGONNE NATIONAL LABORATORY, Metallurgy Division. Annual progress report for 1964. Argonne, Ill., 1964. p.213-5. (ANL-7000).
- /47/ GLASSTONE, S. & SESONSKE, A. Nuclear reactor engineering. Princeton, N.J., Van Nostrand, c 1967.
- /48/ DIENES, G.J. Defects in solids and current concepts of radiation effects. In: HARWOOD J.J., ed. The effects of radiation on materials. New York, Reinhold, c 1958. p. 1-47.

- /49/ WECHLER, M.S. Fundamentals of radiation damage and applications to materials problems in nuclear reactors. Ames, Iowa State University, 1971. (IS-2637).
- /50/ FRYE, J.H. & MC HARGUE, C.J. Radiation damage in structural materials. Oak Ridge, Tenn. Oak Ridge National Laboratory, 1972 (CONF. 720832-1).
- /51/ BILLINGTON, D.S. Radiation effects on physical and metallurgical properties of metals and alloys. In: HARWOOD, J.J. ed. The effects of radiation on materials. New York, Reinhold, c 1958. p. 99-125.
- /52/ BUSH, S.H. Aluminium and magnesium alloys. In: Irradiation effects in cladding and structural materials. New York, Rowman and Pittefield, c 1965. cap. 5.
- /53/ KANGILASKI, M. Radiation effects design Handbook. Sect. 7: Structural alloys. Columbus, Ohio, Battelle Memorial Institute, 1971 (N71-36885).
- /54/ BILLINGTON, D.S. & CRAWFORD, J.H. Radiation damage in solids. Princeton, N.J. Princeton University, 1961.
- /55/ WILKINSON, W.D. & MURPHY, W.F. Nuclear reactor metallurgy. Amsterdam, Van Nostrand, 1953.

- /56/ SIMRAD, M.T. Influence of Radiation Upon Corrosion behavior and surface properties of metals and alloys. In: HARWOOD, J.J. ed. The effects of radiation on materials. New York, Reinhold, c. 1958. p. 126-43.
- /57/ RODRIGUES, C.W. Aspectos de radionproteção e segurança nuclear do IPR-R1 a 250 Kw. Belo Horizonte, Instituto de Pesquisas Radioativas, 1972 (Tese de mestrado).
- /58/ ROCKWELL III, Theodore, ed. Reactor Shielding design manual/ New York/. Inc. Graw-Hill, 1956.
- /59/ EUA. Department of Health, Education and Welfare. Public Health Service. Radiological health handbook. rev. ed. Washington, Superintendent of Documents, Government Printing Office, 1970.
- /60/ COMISSARIAT D'ENERGIE ATOMIQUE. Instruction sur les conditions d'emploi de materiaux. Fascicule 3, 1964.
- /61/ COMPANHIA BRASILEIRA DE TECNOLOGIA NUCLEAR. Instituto de Pesquisas Radioativas. Laboratório de Radioisótopos. Relatório dos exames de ultra-som nas chapas de alumínio. Belo Horizonte, 1973.



APÊNDICE 1

CONTROLE DE QUALIDADE E ACABAMENTO DO TANQUE

## CONTROLE DE QUALIDADE E ACABAMENTO DO TANQUE

Para controle de qualidade do tanque após sua execução, deverão ser realizados testes para verificar sua resistência e estanqueidade. Sugere-se, então, três tipos de testes, de acordo com as referências /7-8-12/:

- . teste de pressão de ar
- . teste de pressão hidrostática
- . teste de fuga.

### Teste de pressão de ar

Este teste é realizado para demonstrar a adequada resistência do tanque.

Consiste em se fazer inspeção visual após o tanque ser pressurizado com ar a 10 psi (0,6 kg/cm<sup>2</sup>) verificando se há modificações na sua estrutura.

### Teste de pressão hidrostática

Consiste em colocar o tanque na posição vertical e enchê-lo com água destilada (pH entre 6 e 7). Após um tempo de 24 horas deve-se fazer inspeção visual para constatar fugas nas soldas. Havendo fugas, os locais devem ser reparados e testado novamente.

### Teste de fuga (bolha de sabão)

Após a cintagem e ancoragem, pressurizar o tanque com ar a 4 psi (0,2 kg/cm<sup>2</sup>). Aplicar em seguida sabão nas soldas verificando se há aparecimento de bolhas em algum ponto das soldas. Qualquer defeito deve ser reparado e novamente o teste deve ser aplicado.

Para acabamento das superfícies do tanque, sugere-se que antes da colocação no poço, a sua superfície interna seja passivada, usando-se o mesmo método empregado no tanque experimental da Capitu, de acordo com as rotinas francêsas /60/. Na superfície externa recomenda-se aplicar uma camada fina de betume para evitar a interação entre o alumínio e o concreto podendo acarretar corrosão.

Estes cuidados são necessários para que se tenha uma maior garantia na durabilidade do tanque.

APÊNDICE 2

CONTROLE DE QUALIDADE DAS CHAPAS

## CONTROLE DE QUALIDADE DAS CHAPAS

Quando do recebimento das chapas, estas foram submetidas ao controle de qualidade descrito abaixo. Isto foi necessário para comprovar a boa qualidade das chapas fabricadas no Brasil.

### Análise química

A análise química realizada em amostras das chapas, mostraram o seguinte resultado /24/:

Silício+Ferro	=	0,37%
Cobre	=	0,012%
Manganês	=	0,023
Magnésio	=	2,1%
Cromo	=	0,21%
Chumbo	=	0,005%
Titânio	=	0,033%
Zinco	=	0,009%
Cádmio	=	0,008%

Esta composição está aproximadamente igual a especificada (Tabela 1).

### Propriedades mecânicas

Os procedimentos para os ensaios de tração e dureza são os descritos no item 2.2.5.

Na Tabela 4 tem-se os resultados obtidos.

Além destes testes, durante a inspeção visual das chapas verificou-se pequenos defeitos superficiais. Por isto, foram realizados ensaios macrográficos de amostras das chapas não se constatando defeitos inter

nos. Do mesmo modo, foi realizado testes de ultra-son em todas as chapas para verificação de defeitos internos e uniformidade de espessura. Nada foi constatado a não ser os defeitos superficiais, e a espessura foi determinada entre 9,7 e 10,0 mm /61/.

Outro teste realizado para verificação do comportamento durante a execução foi o de dobramento na calandra. Após o dobramento foi feito ensaios de dureza na chapa dobrada obtendo-se os mesmos valores para a dureza indicada na Tabela 4. Inspeção visual não constatou defeitos tais como fissuras na superfície.

Desta maneira, constatou-se a boa qualidade das chapas recebidas ressaltando-se, entretanto, o seu aspecto superficial.

