

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Metalúrgica e
de Materiais

Corrosão de Ligas de Alumínio
da Série 5XXX em Meios
Contendo Íons Cloreto

Trabalho de Formatura 1997

Aluno: Alexandre Hara

Orientadora: Prof. Dra. Neusa Alonso-Falleiros

Índice

1. Apresentação e Objetivo	1
2. Resumo	2
3. Revisão Bibliográfica	3
3.1. Características Gerais do Alumínio	3
3.2. Situação do Alumínio no Brasil	4
3.3. Panorama e Tendências do Mercado Mundial	7
3.4. Propriedades e Aplicações das Ligas de Alumínio Estudadas	8
3.5. As Ligas Alumínio-Magnésio	9
3.6. Corrosão por Pite em Ligas de Alumínio	10
3.6.1. Nucleação do Pite	11
3.6.2. Mecanismo do Processo de Corrosão/Passivação	12
4- Materiais e Métodos	14
4.1. Ligas Estudadas	14
4.2. Preparação dos Corpos de Prova	15
4.3. Ensaio Eletroquímico	15
4.3.1. Procedimento Experimental	16
4.3.2. Det. do Potencial de Corrosão em função do Tempo ($E_{corr} \times t$)	18
4.3.3. Determinação do Potencial de Pite do Metal-Base das Ligas	18
4.3.4. Influência da Solda	19
4.3.5. Influência do Tempo de Imersão no Eletrólito antes do Ensaio	19
4.3.6. Influência da Temperatura	19
4.3.7. Influência do Tempo de Exposição ao Ar antes da Imersão	20
4.3.8. Influência da Condição Superficial da liga	20
4.3.9. Influência da Velocidade de Varrimento	21
4.3.10. Influência de Sulfato de sódio na solução	21
5. Resultados e Discussão	23
5.1. Resultados do Potencial de Corrosão pelo Tempo ($E_{corr} \times t$)	23
5.2. Resultados do Potencial de Pite do Metal-Base das Ligas	25
5.3. Resultados da Influência da Solda	29
5.4. Resultados da Influência do Tempo de Imersão no Eletrólito antes do Ensaio	34
5.5. Resultados da Influência da Temperatura	39
5.6. Resultados da Influência do Tempo de Exposição ao Ar Antes da Imersão	41

5.7. Resultados da Influência da Condição Superficial do Material	43
5.8. Resultado da Influência da Velocidade de Varrimento	45
5.9. Resultado da Influência de Sulfato de Sódio na Solução	46
6. Conclusão	53
7. Referências Bibliográficas	55

1. Apresentação e Objetivo

Título: Corrosão de Ligas de Alumínio da Série 5XXX em Meios Contendo Íons Cloreto

Orientadora: Professora Doutora Neusa Alonso - Falleiros

Este trabalho tem por objetivo investigar a resistência à corrosão de ligas de alumínio da série 5XXX através de curvas de polarização potenciodinâmicas, em meios contendo íons cloreto, bem como o efeito da presença de solda no material, do tempo de imersão prévio, do tempo de exposição ao ar antes da imersão, da condição superficial do material, da velocidade de varrimento do processo, da temperatura e da presença de Na_2SO_4 .

Este texto, que representa o trabalho realizado, está dividido em: Revisão Bibliográfica, Procedimento Experimental, Resultados Experimentais, Discussão dos mesmos e Conclusão.

2. Resumo

Investigou-se a resistência à corrosão de ligas de alumínio da série 5XXX, através de curvas de polarização potenciodinâmicas, em meios contendo íons cloreto e também examinou-se o efeito da presença de solda no material, do tempo de imersão prévio, do tempo de exposição ao ar antes da imersão, da condição superficial do material, da velocidade de varrimento do processo, da temperatura e da presença de Na_2SO_4 . Para isto foram escolhidas duas ligas, AA5052 e AA5083, ambas contendo como principal elemento de liga o magnésio. Realizou-se então ensaios potenciodinâmicos em três sistemas: metal base, metal base/solda e solda, de cada liga, todos em solução 3,5% NaCl. Os resultados mostraram que não há diferença significativa no potencial de pite dos três sistemas de cada uma das ligas, isto é, a introdução de regiões de solda não afetou a resistência à corrosão por pite. Investigou-se também a influência do tempo de exposição ao ar (após o lixamento) antes da imersão no eletrólito e do tempo de imersão no eletrólito antes da polarização. Com a análise dos resultados, pode-se concluir que ambas as ligas apresentam um comportamento bastante estável, frente às variáveis de ensaio e de presença ou não de solda, no que se refere à corrosão por pite em presença de íons cloreto.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Características Gerais do Alumínio

O alumínio é o mais importante metal não-ferroso e o desenvolvimento de suas técnicas de fabricação permite que o produto acabado seja produzido a um custo competitivo, com uma expectativa crescente da demanda mundial.

O alumínio é um metal extraído da bauxita, um minério cujo nome vem de Les Baux, povoado francês perto do Reno, onde foram encontradas as primeiras jazidas. Este minério forma perto de 12% da crosta terrestre e isto contribui para que o alumínio seja o terceiro elemento mais abundante da Terra, logo depois do oxigênio e do silício (GUIA TÉCNICO DO ALUMÍNIO, 1994).

Atualmente o alumínio é o material mais utilizado na fabricação de peças, depois do ferro. O alumínio e suas ligas tem grande importância técnica devido às suas características (FINARDI, 1985):

- baixa densidade (2.6 a 2.8 g/cm³);
- elevada relação resistência/peso;
- elevada resistência a corrosão;
- endurecibilidade de muitas ligas;
- facilidade de fabricação;
- possibilidade de tratamento superficiais;
- aparência;
- rapidez na usinagem em comparação com materiais com o aço.

É possível obter-se uma grande variedade de características mecânicas em ligas de alumínio, através das várias combinações de trabalho a frio que o metal deve receber no processo de fabricação.

Frequentemente, pode competir com grande sucesso com materiais mais baratos tendo um menor grau de trabalhabilidade. O metal pode ser fundido por qualquer método conhecido, pode ser laminado em qualquer espessura até folhas mais finas que as de papel, chapas de alumínio podem ser estampadas, cunhadas, repuchadas e corrugadas. O metal pode ser também forjado. Arames de alumínio trefilado de vergões redondos dão origem aos fios de alumínio que, após serem encordoados, transformam-se em cabos condutores. Praticamente, não há limitações para as diversas formas em que o metal pode ser extrudado.

Todas as características do alumínio fazem deste um material de extrema versatilidade. Na maioria das aplicações, duas ou mais destas características entram em jogo, como por exemplo baixo peso combinado com resistência em aeronaves, vagões ferroviários, caminhões e outros equipamentos de transporte. A alta resistência à corrosão e elevada condutibilidade térmica são importantes em equipamentos para a indústria química e petroquímica; estas propriedades combinam com a atoxidade em equipamentos da indústria alimentícia.

Muitas aplicações requerem extrema versatilidade que somente o alumínio possui. Com isso ele vem sendo utilizado cada vez com mais frequência.

3.2. Situação do Alumínio no Brasil

A grande expansão de indústria nacional se dá a partir de 1982, quando entra em operação a usina da VALESUL. Em 1984, a usina ALUMAR (ALCOA + BILLITON), localizada em São Luiz (MA), iniciou sua produção, fabricando 100 mil toneladas/ano. A ALBRÁS (CVRD + consórcio japonês), que começou a ser implantada em 1980, entrou em operação em meados de 1985, fabricando 80 mil toneladas/ano (MONTE; ADAMIAN, 1995).

No período entre 1980 e 1988, a capacidade de produção de alumínio instalada no país passou de 261 mil toneladas para 868 mil toneladas/ano, absorvendo para isto investimentos da ordem de US\$ 2,8 bilhões. Para atingir uma produção de 1,2 milhões toneladas/ano a partir de 1992, as empresas do setor investiram cerca de US\$ 1,4 bilhões (MONTE; ADAMIAN, 1995).

Composta por seis produtores de metal primário, com sete usinas instaladas, e por aproximadamente 300 empresas transformadoras, a indústria de alumínio primário produziu 1195 mil toneladas em 1992, registrando um crescimento de 22,5% em comparação com o ano anterior (MONTE; ADAMIAN, 1995). A *Tabela 3.1* apresenta a capacidade de produção instalada de alumínio primário no Brasil.

Tabela 3.1 - Capacidade de produção instalada de alumínio primário *.

ACIONISTAS	Localização das unidades industriais	1989	1990	1991
ALBRÁS	Belém - PA	160	300	334
ALCAN	Ouro Preto - MG	60	60	55
	Aratu - BA	58	58	58
BILLITON/ ALCOA	São Luís - MA	245	332	351
ALCOA	Poços de Calda - MG	90	90	90
ALUVALE/ BILLITON	Santa Cruz - RJ	86	93	93
CBA	Mairinque - SP	170	196	215
Total		869	1129	1196

* Fonte ABAL (MONTE; ADAMIAN, 1995).

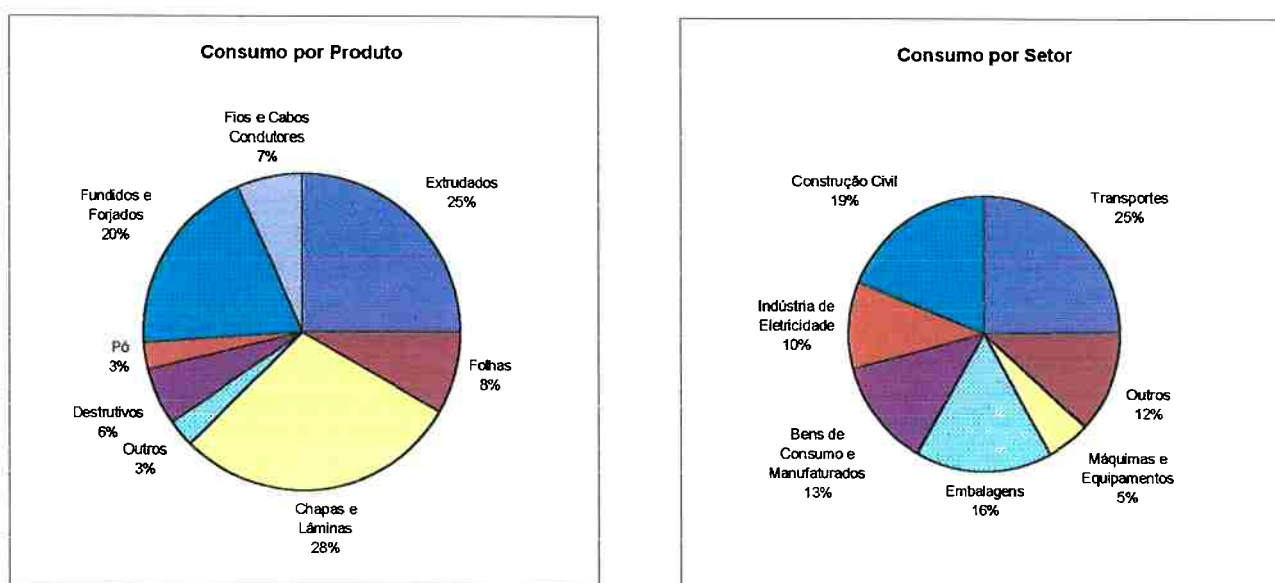
Com tudo isto, a indústria brasileira de alumínio, em 1994, chegou a US\$ 4,1 bilhões, ou seja, 0,8% do PIB brasileiro e 2,1% do PIB industrial (informações divulgadas pela ABAL-Associação Brasileira do Alumínio).

Sexto maior produtor mundial e detentor da terceira maior reserva de bauxita, o Brasil produziu em 1994, 1.185 mil t de alumínio primário. Foi registrado, no

período, um recorde histórico de consumo interno de transformados: 466 mil t, o que significa um consumo per capita de 3 kg/habitante (ver *Quadro 3.1* de consumo por produto e por setor no Brasil em 1994) (MONTE; ADAMIAN, 1995). Além do alumínio primário o Brasil produz e exporta lingotes, chapas, folhas extrudados, fundidos, fios e cabos e pó de alumínio, alinhando-se com os maiores produtores mundiais.

O que falta à indústria nacional, segundo a ABAL, é desenvolver mais e melhorar as tecnologias de fabricação e seus recursos humanos, de modo a ganhar competitividade em termos mundiais.

Quadro 3.1 - Consumo de alumínio no Brasil por produto e setor *.



* Fonte: ABAL (MONTE; ADAMIAN, 1995).

As previsões dos analistas da ABAL para o ano de 1996 são de que a produção deverá atingir 1.207,8 mil toneladas, o que representa um crescimento de 1,7% em relação ao volume de 1995.

O consumo doméstico de produtos transformados deverá continuar crescendo, registrando um novo recorde. As previsões apontam para um crescimento de 6,8%. Setorialmente as previsões de crescimento são as seguintes:

- devem crescer: laminação pura, laminação artefatos, laminação impactos, folhas, fios/cabos, fundição, destrutivos e outros.
- devem decrescer: extrusão e pó.

Segundo projeções as importações deverão sofrer uma queda de 1,1%, atingindo m volume de 94,6 mil t e concentrando maior volume no segundo semestre. Já as exportações do alumínio primário e seus produtos deve ter um crescimento acentuado (18,3%), representando um volume de 944,5 mil t, sendo a maior parcela de alumínio primário (MONTE; ADAMIAN, 1995).

3.3. Panorama e Tendências do Mercado Mundial

Para a indústria de alumínio, especificamente, a instabilidade de preços é uma tônica, não tanto pela introdução de novos materiais, mas pelos custos energéticos e demais taxas, impulsionando o processo de deslocamento das indústrias para os países de terceiro mundo. A locação das reservas de bauxita deverá determinar os sítios futuros para a produção da alumina, e em um futuro próximo, países que oferecerem taxas competitivas para a energia elétrica também atrairão novas fundições.

No presente momento, alguns analistas acreditam que o custo da tonelada de alumínio deverá permanecer entre US\$1.000 e US\$1.200 (MONTE; ADAMIAN, 1995), com conseqüente deterioração da lucratividade. Sendo esta uma ameaça real, deve-se prever a tentativa dos grandes produtores de levar o patamar de preços a níveis mais altos. Segundo o relatório *Survival in Aluminium Smelting*,

elaborado pela *Commodities Research Unit* (CRU), os preços do alumínio primário deverão se manter baixos pelo resto da década. As razões apresentadas foram a existência de estoque grandes e crescentes, principalmente, o volume das exportações provenientes da antiga União Soviética, que deverá aumentar.

De modo geral, em termos de materiais leves e aplicações a temperaturas de intermediárias a elevadas, o alumínio poderá ser mais competitivo do que o titânio e o magnésio, que também requerem processamento de energia intensiva. As ligas de alumínio e lítio deverão ser fortes candidatas para essas aplicações, pois gradativamente estas ligas estão penetrando no setor aeroespacial. Para aplicações estruturais, o aço predominará no mercado, devido aos seus baixos custos de fabricação. Um estudo econômico realizado pelo MIT conclui que hoje, para grandes produções, o aço ainda é o mais competitivo, enquanto que para médias e pequenas o alumínio (compostos por partes) já é mais competitivo.

3.4. Propriedades e Aplicações das Ligas de Alumínio Estudadas

a. AA5052 (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1990)

Aplicações Típicas: canos de óleo e combustíveis de aviões, tanques de combustíveis, aplicações marítimas e transportes, fios e outros. Aplicações que necessitem de boa trabalhabilidade, excelente resistência à corrosão, alta resistência à fadiga e boa soldabilidade.

Propriedades mecânicas:

	Lim. de Resist. à Tração		Lim. de Elasticidade		Elongação, %		Dure- za	Shear Strength		Resist. à Fadiga	
					1.6 mm (1/16 in.)	12.5 mm (1/2 in.)					
Têmpera	MPa	ksi	MPa	ksi	thick	diam	HB(b)	MPa	ksi	MPa	ksi
O	195	28	90	13	25	27	47	125	18	110	16
H32	230	33	195	28	12	16	60	140	20	115	17
H34	260	38	215	31	10	12	68	145	21	125	18
H36	275	40	240	35	8	9	73	160	23	130	19
H38	290	42	255	37	7	7	77	165	24	140	20

Densidade: 2,68 g/cm³ (0,097 lb/in³) a 20°C (68°F).

b. AA5083 (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1990)

Aplicações Típicas: aplicações marítimas, automóveis e aviões, torres de TV, equipamentos de transporte, componentes de mísseis e outras.

Propriedades mecânicas:

	Lim. de Resist. à Tração		Lim. de Elasticidade		Elonga- ção	Dure- za	Shear Strength		Resist. à Fadiga	
Têmpera	MPa	ksi	MPa	ksi	%	HB(b)	MPa	ksi	MPa	ksi
O	290	42	152	22	35	65	179	26	138	20
H18	434	63	407	59	10	105	234	34	152	22
H38	414	60	345	50	15	100	221	32	152	22

Densidade: 2,66 g/cm³ (0,096lb/in³) a 20°C (68°F).

3.5. As Ligas Alumínio-Magnésio (Mondolfo, 1976)

O trabalho em questão utiliza ligas de alumínio do tipo AA5052 e AA5083, que são, essencialmente, ligas alumínio-magnésio. Estas ligas apareceram em torno

do ano 1900, mas seu desenvolvimento foi lento, devido a algumas dificuldades encontradas em sua preparação.

Essas ligas são mais leves que o alumínio puro e tem como característica uma boa resistência à corrosão e um limite de fadiga alto.

Essa resistência à corrosão é considerada excelente tanto em ambiente atmosférico como em água salgada. Porém o teor de impurezas afeta de modo acentuado essa resistência, sendo que as ligas mais impuras possuem resistência à corrosão pobre. De um modo geral, teores de cobre acima de 0.1% diminuem consideravelmente a resistência à corrosão. Ferro e silício acima de 0.45% diminuem a ductilidade e o silício, isoladamente e acima deste valor, diminui o limite de resistência.

Como a densidade do magnésio é $1,7 \text{ g/cm}^3$, a adição deste elemento ao alumínio diminui a densidade dessas ligas.

A presença de umidade nos fornos de tratamento térmico causa a oxidação interna das ligas de alumínio-magnésio, o que é muitas vezes acompanhado de formação de bolhas superficiais (blisters).

As ligas de alumínio-magnésio mais utilizadas são ligas trabalhadas, que contém até no máximo 5% de magnésio, aproximadamente. Essas ligas não são endurecíveis por tratamento térmico, sendo encruadas quando for requerida maior resistência mecânica. O cromo e o manganês melhoram as propriedades mecânicas e diminuem a susceptibilidade à corrosão por pite e corrosão sob tensão.

As ligas com menor teor de magnésio, até 1,41%, são usadas em molduras e frisos anodizados de automóveis. As ligas com teor de magnésio superior a 2,5% são usadas em tanques de tubulação de combustível, equipamentos de

transporte, vasos de pressão, painéis de carrocerias de veículos e outras aplicações requerendo uma boa combinação de resistência à corrosão, resistência mecânica moderada e boa soldabilidade.

3.6. Corrosão por Pite em Ligas de Alumínio

O alumínio possui uma excelente resistência à corrosão e por isso é um dos principais metais utilizados. Esta resistência deve-se à sua fina película de óxido que é fortemente ligada à superfície e que, se danificada, ela se refaz rapidamente na maioria dos meios. Em uma superfície que acabou de ser lixada e exposta ao ar, a barreira de filme óxido tem somente 1 nm (10 Å) de espessura mas é altamente eficiente na proteção do alumínio contra a corrosão (METALS HANDBOOK, 1987).

Corrosão por pite é a forma mais comum de ataque por corrosão em ligas de alumínio. Quando o alumínio é exposto a água doce ou do mar, ou outros eletrólitos neutros, os pites formam-se em um ponto localizado na descontinuidade do filme óxido.

Além de ser o tipo mais comum de corrosão do alumínio é a mais destrutiva delas. Ela causa falha do equipamento por perfuração, com uma pequena porcentagem de perda de massa em sua estrutura. Normalmente é difícil detectar os pites devido ao seu pequeno tamanho e também porque costumam estar cobertos pelos produtos de corrosão. Além disso, é difícil medir quantitativamente e comparar com a extensão do pite por causa da variação das profundidades e do número de pites que podem ocorrer sobre as mesmas condições. Algumas vezes o pite pode levar longos tempos para aparecerem (de alguns meses ou até anos), sendo assim difícil a sua previsão em testes de laboratório. O pite é uma forma traiçoeira de corrosão pois ela ocorre

localizadamente e de forma intensa e falhas podem ocorrer com extrema rapidez (FONTANA, M. G., 1978).

3.6.1. Nucleação do Pite

A corrosão por pite, que é uma forma de corrosão localizada, está associada com a quebra do filme óxido e que normalmente ocorre em uma superfície plana (SCULLY, J. C., 1989). Em superfícies passivas ou metais cobertos com filmes de alta resistência, o pite ocorre só na presença de certos anions, os quais são normalmente considerados como agressivos. Brometos, iodetos e cloretos são três exemplos, sendo o cloreto o mais predominante.

Em soluções de cloreto, pites nucleiam em localidades onde o filme óxido tende a ser descontínuo e também onde as condições locais são mais favoráveis para isto. Os pites podem nuclear em pontos não só determinados por falhas na superfície do filme óxido, mas também por determinados locais no metal. Estes locais podem ser heterogeneidades na superfície, como por exemplo, contornos de grão, inclusões não metálicas provenientes dos processos de fundição, ou impurezas. Todos estes locais podem ser considerados potenciais locais de nucleação de pites (SCULLY, J. C., 1989).

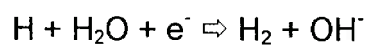
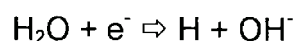
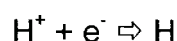
3.6.2. Mecanismo do Processo de Corrosão/Passivação

O mecanismo de corrosão do alumínio e suas ligas é baseada na dissolução dos átomos de Al de locais ativos ou regiões com defeito do material passivado. Os átomos dissolvidos são gradualmente removidos pela formação do hidróxido que aumenta a coordenação de 1 para 3 para formar $\text{Al}(\text{OH})_3$. O hidróxido adere na superfície em soluções neutras e conseqüentemente abaixa a taxa de corrosão

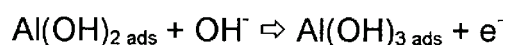
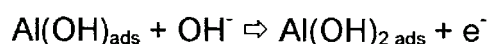
dando assim um ótimo comportamento de passivação para o alumínio e suas ligas.

Em soluções ácidas ou alcalinas o $\text{Al}(\text{OH})_3$ reage de forma puramente química para formar espécies solúveis que vão para a solução deixando espaços expostos que serão atacados, aumentando assim a taxa de corrosão do material neste meio. O mecanismo do processo de corrosão representa um par de reação irreversível, a parte anódica que se dá pela redução de H^+ , água ou oxigênio dissolvido levando para evolução do hidrogênio e formação de OH^- nas proximidades das regiões ativas de acordo com:

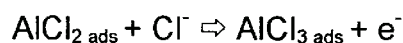
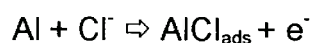
Reação Catódica:



Reação Anódica



Na presença de íons cloreto, a dissolução do metal ocorre através do ataque de Cl^- de acordo com:



4- Materiais e Métodos

4.1. Ligas Estudadas

Para este trabalho foram escolhidas duas ligas, AA 5052 e AA 5083, ambas contendo como principal elemento de liga o magnésio (para efeito de comparação).

As composições químicas nominais das duas ligas, bem como os resultados de análise química estão apresentadas nas *Tabelas 4.1 e 4.2*.

Tabela 4.1 - Composição química nominal para as ligas AA5052 e AA5083 (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1990)

	AA 5052 - %	AA 5083 - %
Al	95,75 - 97,65	92,95 - 95,45
Mg	2,2 - 2,8	4,5 - 5,6
Fe	0,40 max	0,40 max
Cr	0,15 - 0,35	0,20 max
Si	0,25 max	0,30 max
Mn	0,10 max	0,05 - 0,20
Cu	0,10 max	0,10 max
Zn	0,10 max	0,10 max
Outros	0,15 max	0,15 max

Tabela 4.2 - Resultado da análise química para as ligas AA5052 e AA5083 (análise realizada pela ALCAN).

	AA 5052 - %	AA 5083 - %
Al	96.75	94.89
Mg	2.62	4.50
Fe	0.26	0.00
Cr	0.18	0.06
Si	0.11	0.13
Mn	0.03	0.20
Cu	0.03	0.04
Zn	0.02	0.01

Verificou-se com os resultados que as ligas obedecem as especificações da composição química.

Os ensaios foram realizados com três tipos de amostras para cada liga:

- amostras apenas do metal base;
- amostras apenas da solda;
- amostras contendo parte do metal base e parte da solda.

4.2. Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos-de-prova do metal base foram todos embutidos de modo a expor aos ensaios de corrosão a seção perpendicular à direção de laminação.

As amostras foram embutidas em baquelita e ao final obteve-se cinco corpos-de-prova de cada tipo (metal base, solda e metal base/solda) para cada liga.

4.3. Ensaios Eletroquímicos

Para a realização dos ensaios de polarização cíclica foi utilizado um potenciostato EG&G Princeton Applied Research (PAR) Modelo 273. O controle dos parâmetros de ensaio, assim como o registro dos resultados foram realizados por meio dos programas “Model 342 Softcorr Corrosion Software v.3.2” e “Model 352 Corrosion Analysis Software v.2.10”, instalados no microcomputador acoplado ao potenciostato. O eletrodo de referência utilizado foi o eletrodo de calomelano saturado (ECS), empregado-se um capilar de Luggin contendo solução saturada em KCl como ponte salina. Como contra eletrodo foi utilizado um fio de platina. O eletrodo de trabalho consistia no corpo-de-prova embutido em baquelita, com uma haste de aço inoxidável rosqueado

ao mesmo, para fins de contato elétrico. A sustentação e o isolamento do conjunto era proporcionado por um tubo de vidro vedado na extremidade com fita teflon, sendo encaixado em lugar próprio na célula de corrosão. Esta célula era preenchida com aproximadamente 700mL da solução empregada como eletrólito na ocasião da realização de cada ensaio. A *Figura 4.3* apresenta um esquema do arranjo experimental.

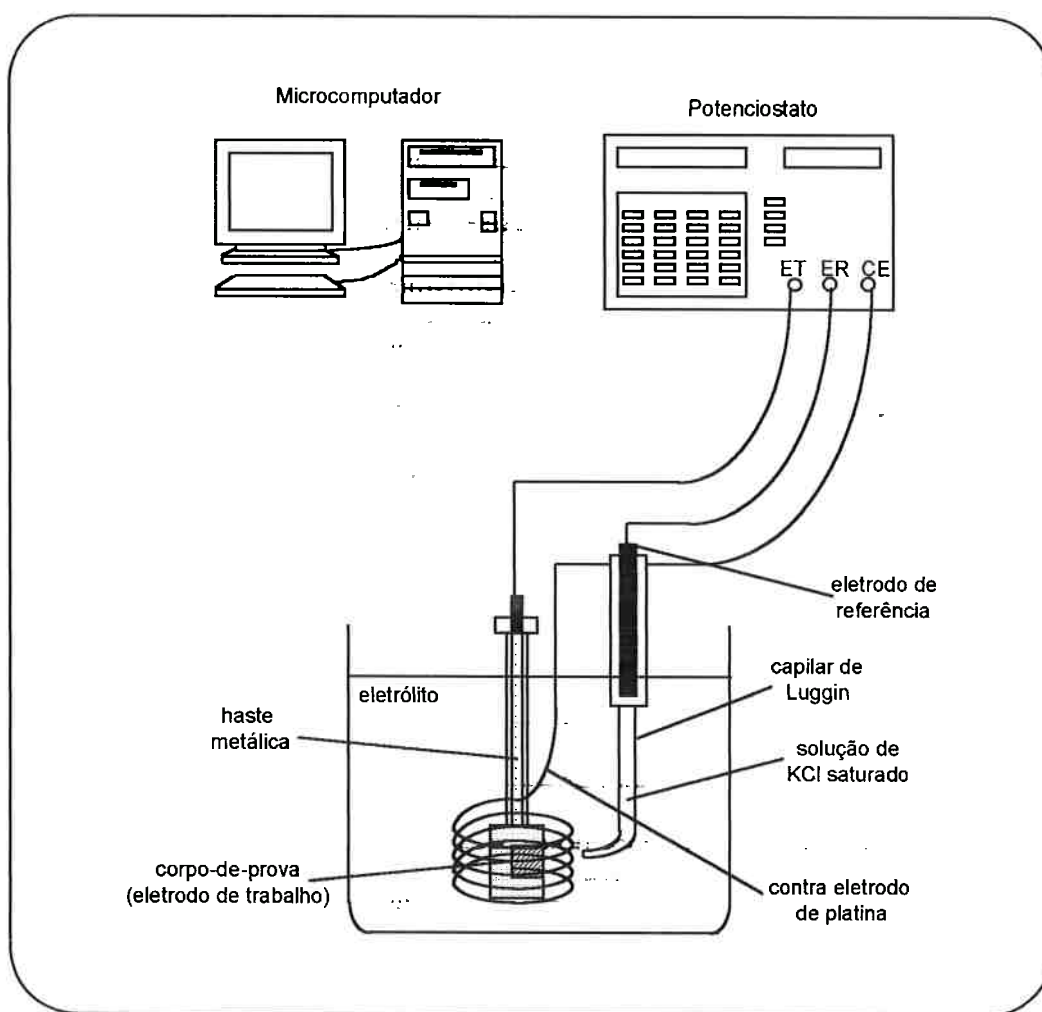


Figura 4.3 - Esquema do equipamento de pesquisa

4.3.1. Procedimento Experimental

Em condições normais de serviço o pite pode levar um longo tempo para ocorrer. Para se estudar este fenômeno ele pode ser induzido por uma polarização anódica. Este procedimento é também um método útil para comparar a resistência ao pite de diversas ligas em um determinado meio. As amostras são polarizadas anodicamente e a quebra do filme passivo é indicado pelo aumento da corrente em um determinado potencial, chamado de potencial de pite (E_p). Tal resultado é mostrado na *Figura 4.5*, que ilustra a ocorrência do pite no alumínio. No potencial de pite, E_p , a corrente irá aumentar com o tempo, pois o crescimento do pite está ocorrendo. Quanto maior for o potencial de pite, melhor é a resistência ao pite da liga (SCULLY, J.C., 1989).

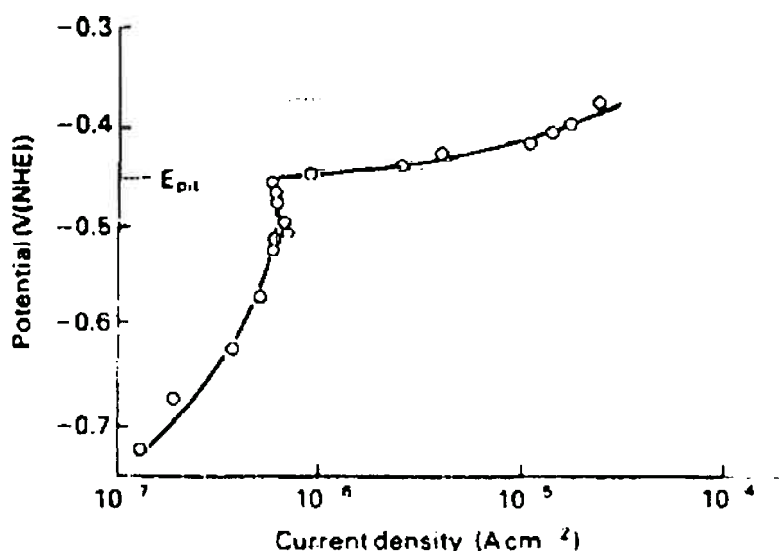


Figura 4.5 - Curva de polarização anódica de Al em solução NaCl. Quando o pite ocorre, a densidade de corrente aumenta em função do tempo. (SCULLY, J.C., 1989). Nota-se que $E_p = -0,45V_{NHE}$ ou $E_p = -0,70V_{ECS}$.

O potencial de proteção, E_{pp} , é determinado pela reversão do potencial depois que o pite já foi iniciado (aumento da densidade de corrente). E_{pp} é o potencial no qual a densidade de corrente atinge o valor da densidade de corrente passiva, correspondendo assim a reformação do filme passivo sobre as superfícies dos pites, processo chamado de repassivação. O potencial de proteção não é

sempre fácil de se determinar, particularmente se os pites são grandes e de formas irregulares (SCULLY, J.C., 1989).

4.3.2. Determinação do Potencial de Corrosão em função do Tempo ($E_{\text{corr}} \times t$)

O primeiro passo foi o levantamento da curva $E_{\text{corr}} \times t$ para ambas as ligas (AA 5052 e AA 5083) no metal base. Para isto utilizou-se as seguintes condições:

- ✓ solução: NaCl 3,5%
- ✓ temperatura: $(22 \pm 2)^{\circ}\text{C}$

Preparou-se o equipamento (como descrito anteriormente) com solução NaCl 3,5%. Lixou-se o corpo de prova na lixa #600, imergiu-se na eletrólito e iniciou-se a leitura do potencial. O tempo de duração foi de uma hora. Realizou-se um ensaio para cada liga no sistema metal-base.

4.3.3. Determinação do Potencial de Pite do Metal-Base das Ligas

Nesta parte realizou-se 5 ensaios para cada liga, utilizando-se as seguintes condições de ensaio:

- ✓ solução: NaCl 3,5%
- ✓ temperatura: $(22 \pm 2)^{\circ}\text{C}$
- ✓ imersão: logo após passar lixa #600
- ✓ $t_{\text{inicial (imersão)}}$: 15 min
- ✓ velocidade de varrimento: 1 mV/s

Após o sistema estar montado, lixava-se o corpo-de-prova na lixa #600 e em seguida colocava-o dentro do eletrólito. Permanecia imerso no eletrólito por 15 min e então iniciava-se o ensaio. A reversão era feita manualmente perto de $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Terminava-se o ensaio após a curva (depois da reversão) cruzar a curva inicial para se determinar o potencial de proteção (E_{pp}).

4.3.4. Influência da Solda

Neste item procurou-se determinar qual seria a influência da solda no potencial de pite das duas ligas. Para isto trabalhou-se com dois sistemas: metal-base/solda e solda. Utilizou-se as mesmas condições de ensaio do item anterior. Realizaram-se 5 ensaios de cada liga para cada sistema, num total de 20 ensaios.

4.3.5. Influência do Tempo de Imersão no Eletrólito antes do Ensaio

Estudou-se aqui qual a influência do tempo de imersão no eletrólito nas curvas de polarização cíclica. Para isto variou-se os tempos em: 0 minutos, 30 minutos, 90 minutos (1,5 horas) e 1230 minutos (20,5 horas). Os ensaios foram feitos para a liga AA5083 (metal base). As outras condições continuavam as mesmas dos ensaios anteriores, sendo as seguintes:

- ✓ solução: NaCl 3,5%
- ✓ temperatura: $(22\pm 2)^\circ\text{C}$
- ✓ imersão: logo após passar lixa #600
- ✓ $t_{\text{inicial (imersão)}}$: 0 min / 30 min / 90 min / 1230 min
- ✓ velocidade de varrimento: 1 mV/s

4.3.6. Influência da Temperatura

Para verificar o efeito da temperatura da solução no potencial de pite, realizou-se um ensaio com uma temperatura de aproximadamente 40°C. As condições continuaram a ser as mesmas:

- ✓ solução: NaCl 3,5%
- ✓ temperatura: 40 °C
- ✓ imersão: logo após passar lixa #600
- ✓ $t_{\text{inicial (imersão)}}$: 15 min
- ✓ velocidade de varrimento: 1 mV/s

4.3.7. Influência do Tempo de Exposição ao Ar antes da Imersão

Variou-se aqui o tempo de exposição ao ar antes da imersão. Nos ensaios anteriores a imersão era feita logo após o lixamento (lixa #600). Neste caso variou-se o tempo de exposição ao ar após o lixamento, primeiro em 20,5 horas antes da imersão e outro corpo-de-prova por 20 dias antes do ensaio. As condições de ensaio foram as seguintes:

- ✓ solução: NaCl 3,5%
- ✓ temperatura: (22±2)°C
- ✓ imersão: 20,5 horas após passar lixa #600 / 20 dias após passar lixa #600
- ✓ $t_{\text{inicial (imersão)}}$: 15 min
- ✓ velocidade de varrimento: 1 mV/s

4.3.8. Influência da Condição Superficial do Material

Para verificar a influência da condição superficial do material ensaiou-se um corpo de prova lixado até a politriz de $1\mu\text{m}$. Para o ensaio utilizou-se as mesmas condições dos ensaios anteriores:

- ✓ solução: NaCl 3,5%
- ✓ temperatura: $(22\pm 2)^{\circ}\text{C}$
- ✓ imersão: logo após passar pela politriz de $1\mu\text{m}$
- ✓ t_{inicial} (imersão): 15 min
- ✓ velocidade de varrimento: 1 mV/s

4.3.9. Influência da Velocidade de Varrimento

Para verificar a influência da velocidade de varrimento ensaiou-se um corpo de prova com velocidade de varrimento de 0,5 mV/s e comparou-se com o ensaiado a 1mV/s. Para o ensaio realizou-se as mesmas condições dos ensaios anteriores:

- ✓ solução: NaCl 3,5%
- ✓ temperatura: $(22\pm 2)^{\circ}\text{C}$
- ✓ imersão: logo após passar lixa #600
- ✓ t_{inicial} (imersão): 15 min
- ✓ velocidade de varrimento: 0,5 mV/s

4.3.10. Influência de Sulfato de Sódio na Solução

Nesta situação adicionou-se na sulfato de sódio (Na_2SO_4) à solução para observar a sua influência sobre a curva de polarização cíclica. A primeira

solução foi preparada com 3,5% NaCl + 3,5% Na₂SO₄, sendo que a segunda foi 3,5% NaCl + 7,0% Na₂SO₄. As condições de ensaio foram as seguintes:

- ✓ solução: NaCl 3,5% +Na₂SO₄ (3,5% e 7,0%)
- ✓ temperatura: (22±2)°C
- ✓ imersão: logo após passar lixa #600
- ✓ t_{inicial} (imersão): 15 min
- ✓ velocidade de varrimento: 1 mV/s

5. Resultados e Discussão

Serão mostrados e discutidos a seguir os resultados eletroquímicos obtidos.

5.1. Resultados do Potencial de Corrosão pelo Tempo ($E_{\text{corr}} \times t$)

O primeiro passo foi a determinação do potencial de corrosão das duas ligas (AA5052 e AA5083) para estabelecer o tempo de imersão no eletrólito antes da realização do ensaio.

Os resultados obtidos estão apontados nas seguintes *Figuras 5.1, 5.2 e 5.3*.

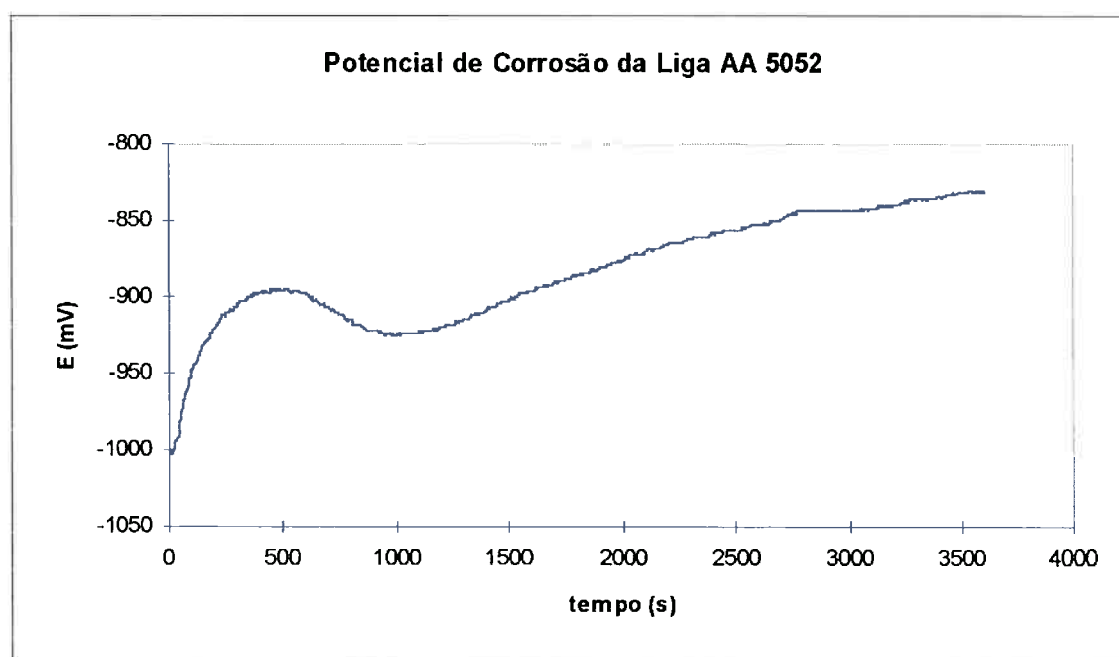


Figura 5.1 - Curva de $E_{\text{corr}} \times t$ para a liga AA5052. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 22°C.

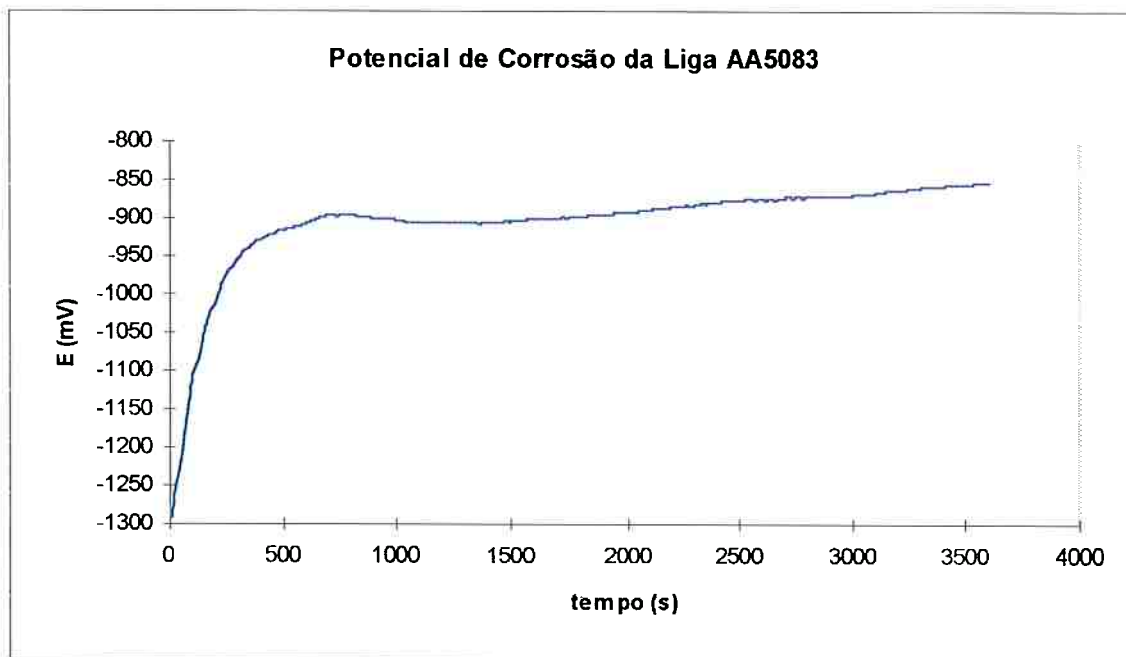


Figura 5.2 - Curva de E_{corr} x t para a liga AA5083. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C.

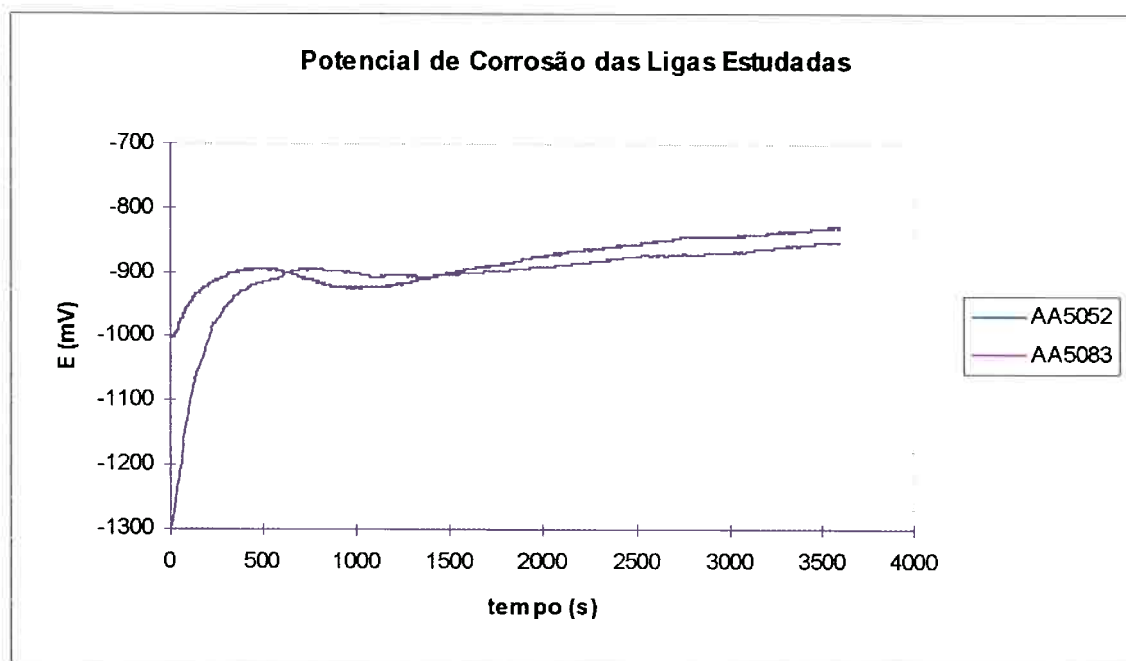


Figura 5.3 - Curva de E_{corr} x t para as ligas AA5083 e AA5052. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C.

Depois de terem sido realizados estes dois ensaios determinou-se que o tempo inicial de imersão seria de 15 minutos (900 segundos), onde o potencial das

duas ligas já haviam alcançado patamares mais estáveis. Pela *Figura 5.3* observou-se que as duas ligas tiveram comportamentos semelhantes após 500 segundos estabilizando-se em um patamar de aproximadamente -900 mV. A única diferença está entre o intervalo de 0 a 500 segundos onde a liga AA5083 iniciou em um valor bem mais baixo que a liga AA5052.

5.2. Resultados do Potencial de Pite do Metal-Base das Ligas

Foram realizados 5 ensaios para cada liga a fim de levantar o potencial de pite (E_p) assim como seu potencial de proteção (E_{pp}).

Para estes ensaios utilizou-se as seguintes condições:

- Solução 3,5% NaCl;
- Temperatura = (22 ± 2) °C;
- $t_{\text{inicial (imersão)}}$ = 15 min;
- i de reversão para se obter E_{pp} = $100 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ (manualmente);
- Término = parar manualmente ao cruzar a curva.

A *Figura 5.4* mostra uma das curvas da liga AA5052:

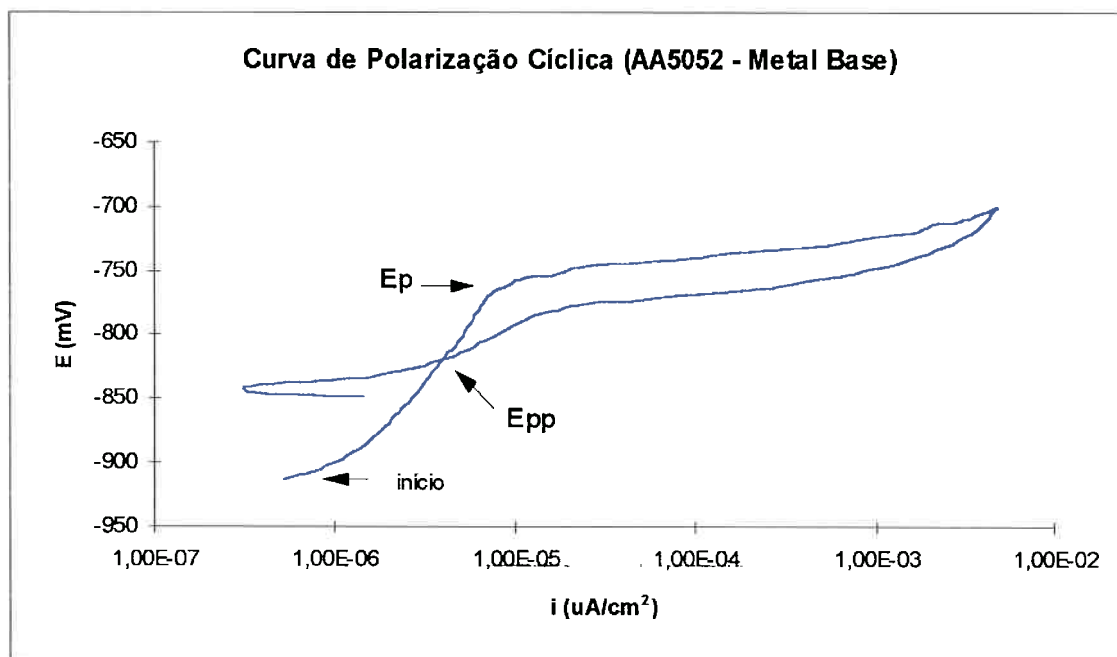


Figura 5.4. - Curva de E x I para a liga AA5052. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C, t inicial (imersão) = 15 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

Os resultados das 5 curvas encontram-se na *Tabela 5.1* abaixo:

Tabela 5.1 - Resultados levantados das 5 curvas de polarização cíclica da liga AA5052

AA5052 Metal Base			
	$E_{corr} (mV)_{ecs(*)}$	$E_p (mV)_{ecs(*)}$	$E_{pp} (mV)_{ecs(*)}$
1	-877	-735	-775
2	-849	-770	-
3 ^(**)	-913	-760	-820
4	-920	-745	-780
5	-875	-740	-830
Média	-887 ± 30	-750 ± 15	-801 ± 28

(*) ecs - eletrodo de calomelano saturado

(**) Resultados da *Figura 5.4*.

A *Figura 5.5* mostra uma das curvas da liga AA5083:

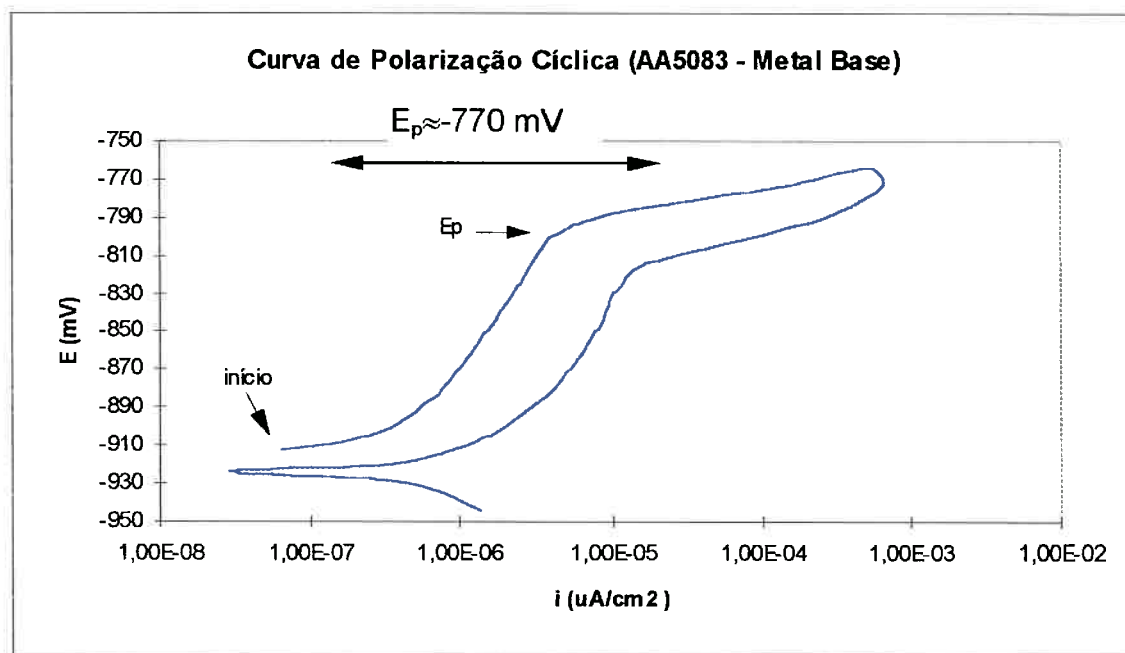


Figura 5.5. - Curva de $E \times i$ para a liga AA5083. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C, t inicial (imersão) = 15 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

Os resultados das 5 curvas encontram-se na Tabela 5.2 abaixo:

Tabela 5.2 - Resultados levantados das 5 curvas de polarização cíclica da liga AA5083

AA5083 Metal Base			
	$E_{corr} (mV)_{ecs(*)}$	$E_p (mV)_{ecs(*)}$	$E_{pp} (mV)_{ecs(*)}$
1	-864	-770	-
2 ^(**)	-903	-780	-
3	-895	-815	-
4	-855	-780	-
5	-885	-770	-
Média	-880 ± 30	-783 ± 15	-

(*) ecs - eletrodo de calomelano saturado

(**) Resultados da Figura 5.5.

Notou-se que a liga AA5083 não apresentou potencial de proteção para nenhum dos 5 ensaios.

Figura 5.6 - Curva de polarização potenciodinâmica para a liga AA5083 em solução de 3,5% NaCl (SAATCH, A., GOLOZAR, M.A., MOZAFARINIA, R., 1996)

A *Figura 5.6* mostra uma curva de polarização potenciodinâmica para a liga AA5083, onde se pode observar um $E_p \approx -770$ mV (potencial de pite), o que ficou muito próximo do encontrado nos ensaios ($E_p = 783 \pm 15$ mV). Deve-se lembrar ainda que o valor do potencial de pite retirado da *Figura 5.6* é aproximado devido à imprecisão da figura.

A principal diferença entre estas duas ligas está no teor de magnésio: a liga AA5052 apresenta 2,62Mg, enquanto que a liga AA5083, 4,5%Mg. Este elemento forma precipitados com o alumínio da liga. Não foi investigado se a nucleação do pite ocorre nos locais com precipitados, mas talvez esta diferença na composição química explique a melhor resistência à corrosão por pite da liga AA5052, que deve apresentar menor quantidade de precipitados com Mg.

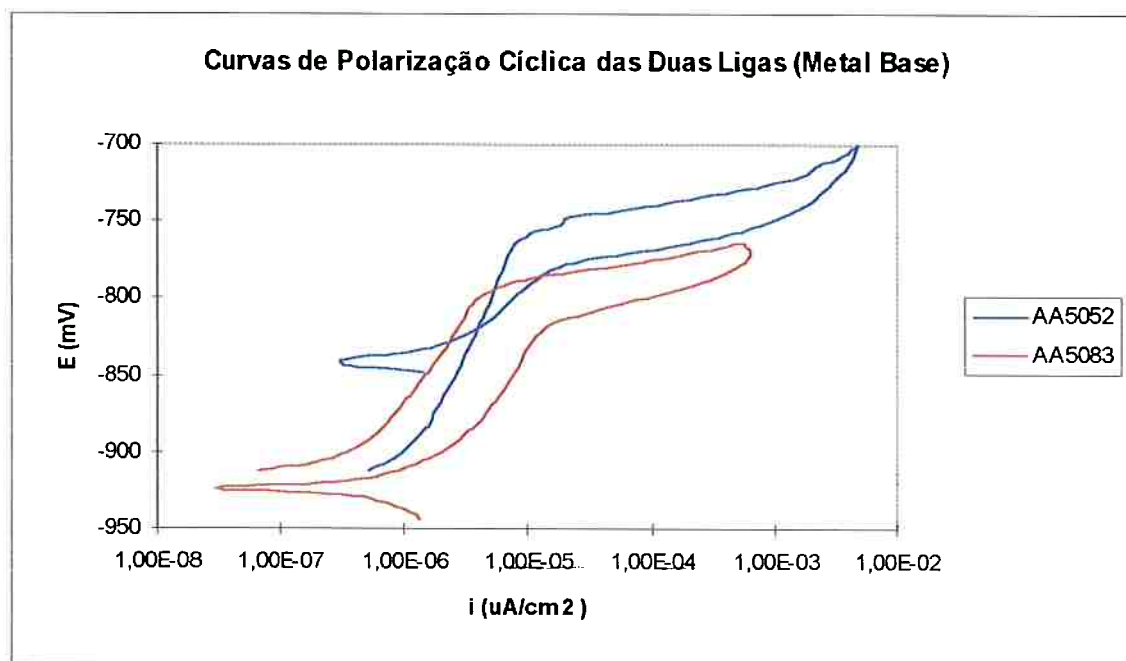


Figura 5.7 - Curva de $E \times I$ para a liga AA5083. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C , t inicial (imersão) = 15 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

Como pode se observar na *Figura 5.7*, a liga AA5052 possui maior resistência à corrosão por pite do que a liga AA5083. Isto também pode ser constatado comparando-se a média do potencial de pite das 5 curvas (*Tabela 5.1* e *Tabela*

5.2) de cada liga. A média do E_p da liga AA5052 é (-750 ± 15) mV enquanto que a média do E_p da liga AA5083 é (-783 ± 19) mV.

5.3. Resultados da Influência da Solda

Para esta verificação utilizou-se dois sistemas para cada liga: metal base/solda e somente a solda. A solda do metal base cuja liga era a AA5052 é da mesma liga (AA5052). Já a solda da liga AA5083 é a AA5356.

As Figuras 5.8 e 5.9 mostram curvas da liga AA5052 de metal base/solda e solda respectivamente.

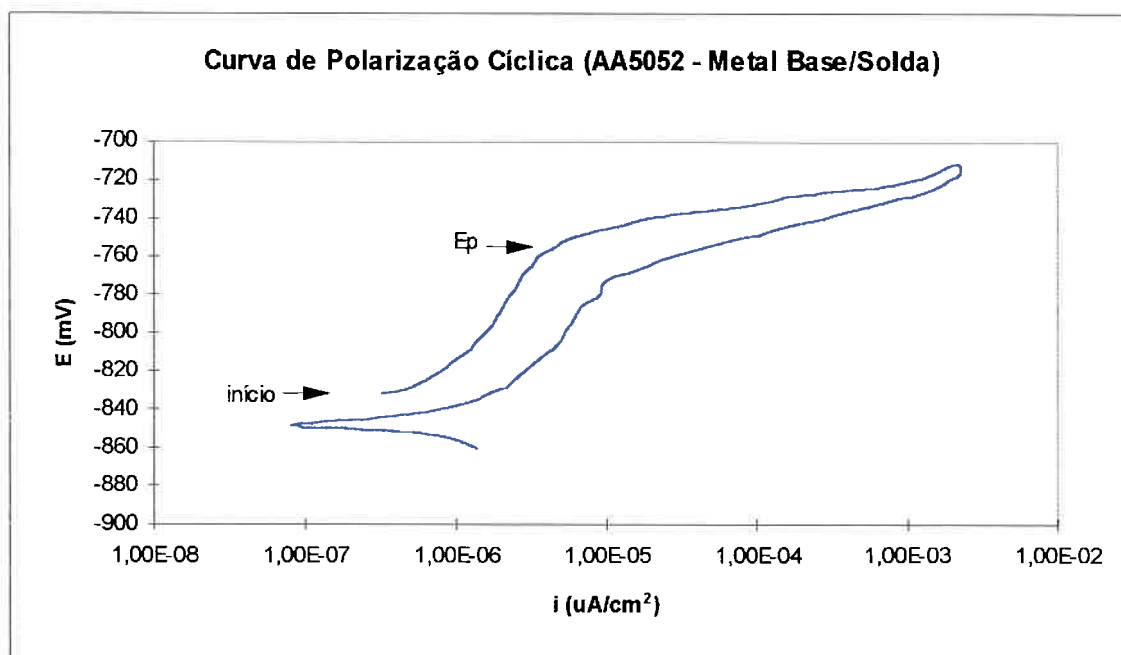


Figura 5.8 - Curva de $E \times I$ para a liga AA5052 (metal base/solda). Condições: solução -NaCl 3,5%, temperatura - 23°C , t inicial (imersão) = 15 min-velocidade de varrimento $1,0 \text{ mV/s}$.

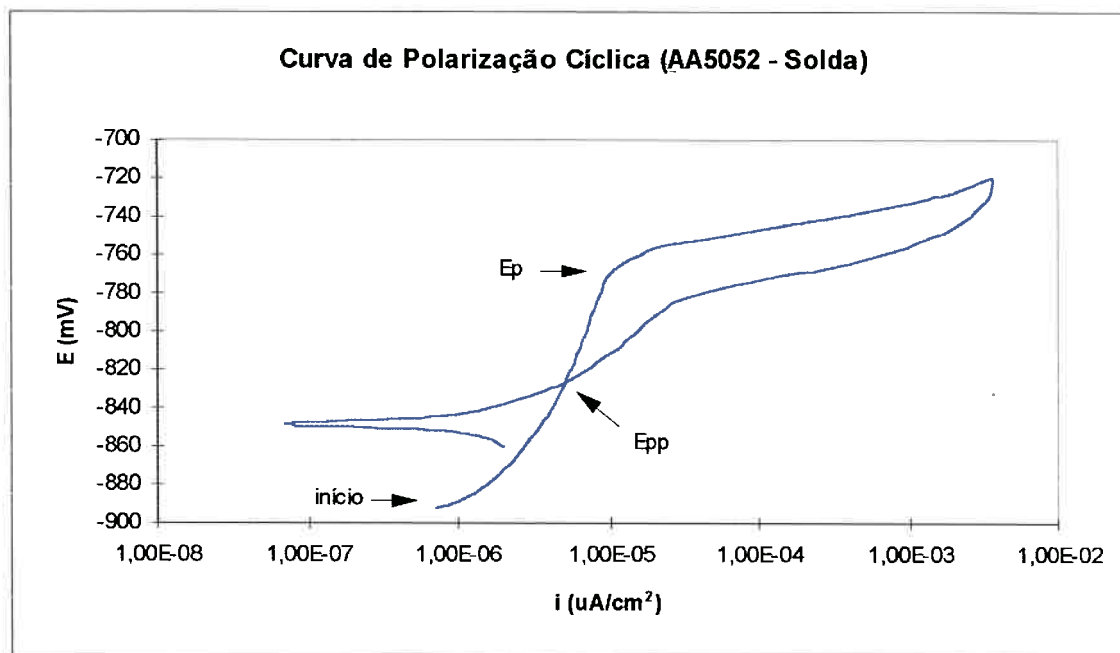


Figura 5.9 - Curva de $E \times i$ para a liga AA5052(solda). Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C, t inicial (imersão) = 15 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

A Tabela 5.3 (abaixo) mostra os resultados obtidos da liga AA5052 após cinco ensaios de cada sistema (metal base/solda e solda).

Tabela 5.3. - Resultados obtidos para a liga AA 5052. Valores médios de cinco medidas.

Liga	Sistema	E_{corr} (mV) _{ecs**}	E_p (mV) _{ecs**}	E_{pp} (mV) _{ecs**}
AA 5052	MB*	-887 ± 30	-750 ± 15	$-801 \pm 28^{(b)}$
AA 5052 ^(a)	MB*/Solda	-876 ± 57	-746 ± 9	$-765^{(c)}$
AA 5052	Solda	-871 ± 20	-773 ± 13	-832 ± 6

*MB - metal base

** ecs - eletrodo de calomelano saturado

(a) Foram considerados 3 curvas das cinco ensaidas (as outras 2 não deram resultados conclusivos)

(b) 4 curvas das 5 ensaidas tiveram E_{pp}

(c) 1 curva das 3 ensaidas tiveram E_{pp}

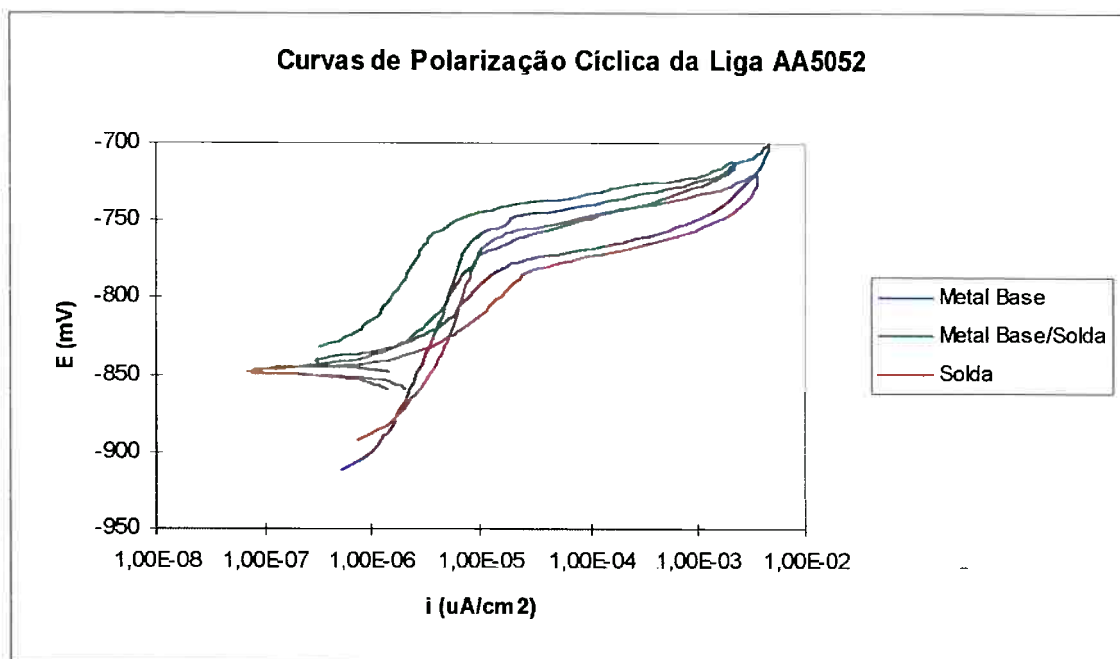


Figura 5.10 - Curvas de $E \times I$ da liga AA5052 para os três sistemas (metal base, metal base/solda e solda). Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C, t inicial (imersão) = 15 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

Analisando a *Figura 5.10* e a *Tabela 5.3*, pode-se notar que a solda teve menor resistência à corrosão por pite do que os sistemas metal base e metal base/solda. Os valores do potencial de pite (E_p) do metal base e metal base/solda foram muito próximos provavelmente devido à relação entre a área de solda e a área do metal base que era pequena. Com isso $E_{p(\text{metal base})} \approx E_{p(\text{metal base/solda})}$ (-750 ± 15 mV e -746 ± 9 mV, respectivamente). Portanto, a presença da solda nesta liga praticamente não influenciou a resistência à corrosão por pite.

As *Figuras 5.11* e *5.12* mostram curvas da liga AA5083 de metal base/solda e solda respectivamente.

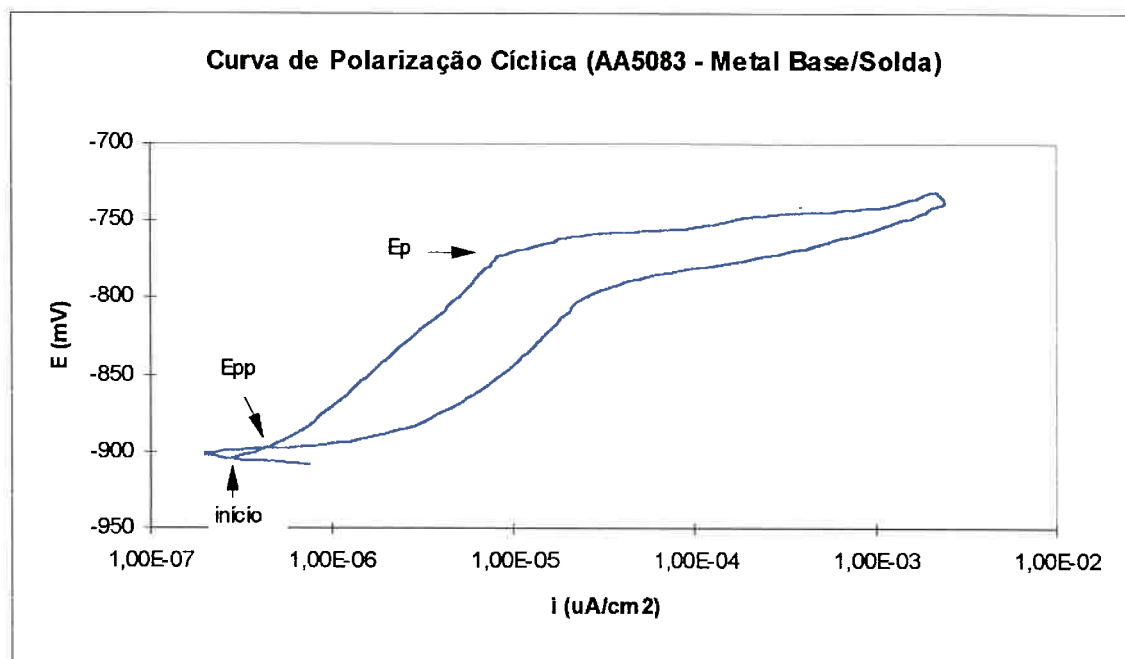


Figura 5.11 - Curva de $E \times i$ para a liga AA5083 (metal base/solda). Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C , t inicial (imersão) = 15 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s. (A solda é da liga AA5356).

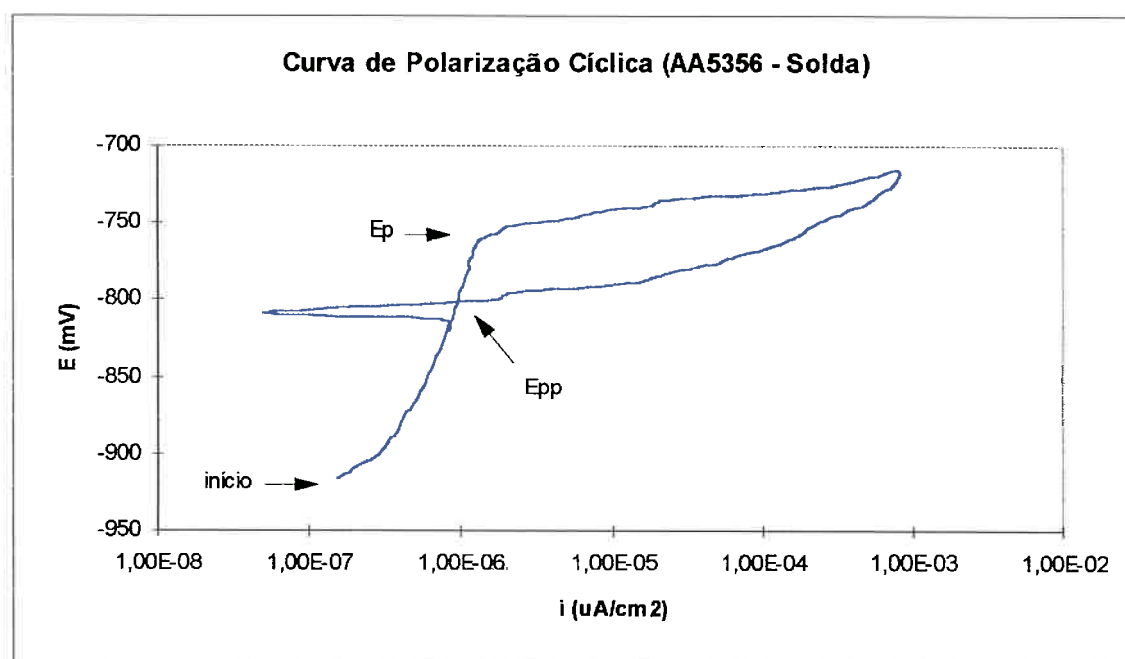


Figura 5.12 - Curva de $E \times i$ para a liga AA5356 (solda). Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C , t inicial (imersão) = 15 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s. (A solda é da liga AA5356).

A Tabela 5.4 (abaixo) mostra os resultados obtidos da liga AA5083 após cinco ensaios de cada sistema (metal base/solda e solda).

Tabela 5.4 - Resultados obtidos para a liga AA5083. Valores médios de cinco medidas.

Liga	Sistema	E_{corr} (mV) _{ecs**}	E_p (mV) _{ecs**}	E_{pp} (mV) _{ecs**}
AA 5083	MB*	-880 ± 20	-783 ± 19	-(a)
AA 5083 ^(b)	MB*/Solda	-891 ± 21	-775 ± 15	$-900^{(c)}$
AA 5356	Solda	-894 ± 59	-763 ± 12	-791 ± 6

*MB - metal base

** ecs - eletrodo de calomelano saturado

(a) Nenhuma das 5 curvas tiveram E_{pp}

(b) Foram considerados 3 curvas das cinco ensaiadas (as outras 2 não deram resultados conclusivos)

(c) 1 curva das 3 ensaiadas teve E_{pp}

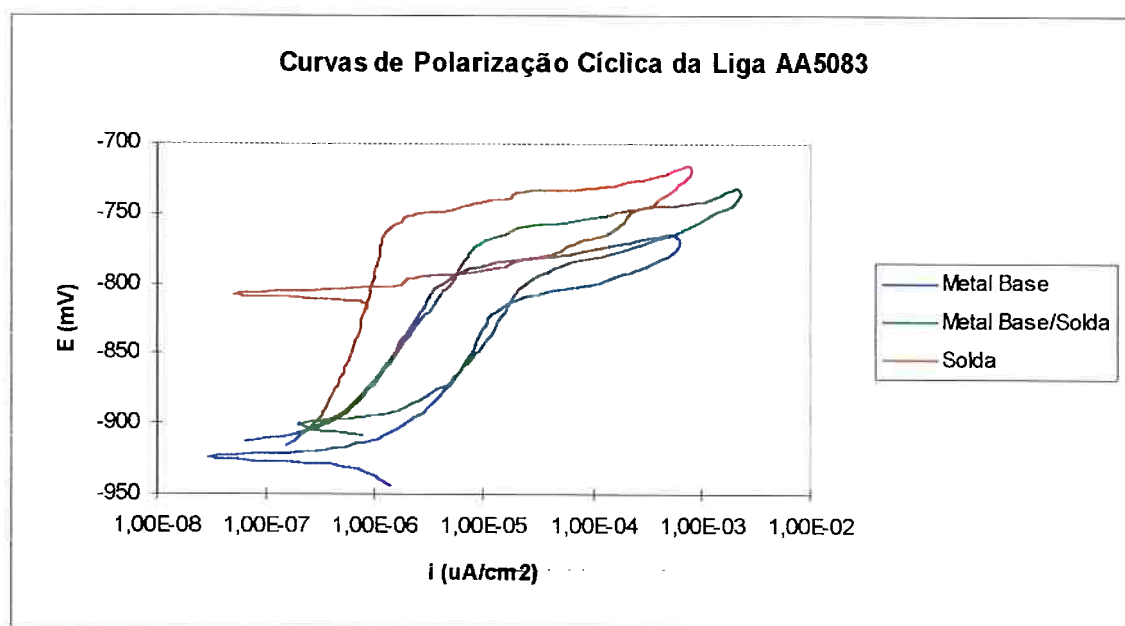


Figura 5.13 - Curva de $E \times I$ para a liga AA5083. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C, t inicial (imersão) = 15 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s. (obs: a solda é da Liga AA5356).

Analisando a Figura 5.13 e a Tabela 5.4, pode-se notar que a solda teve maior resistência à corrosão por pite do que os sistemas metal base e metal base/solda, ao contrário do que ocorreu com a liga AA5052. Os valores do

potencial de pite (E_p) da solda foram maiores do que o sistema metal base/solda que por sua vez foram maiores do que só o metal base. Com isso $E_{p(\text{metal base})} < E_{p(\text{metal base/solda})} < E_{p(\text{solda})}$ (-783 ± 19 mV, -775 ± 15 mV e -763 ± 12 respectivamente). Já neste caso a presença da solda aumentou a sua resistência à corrosão por pite.

Comparando os resultados das duas ligas (AA5052 e AA5083) nota-se que tiveram resultados opostos, ou seja, a presença da solda na liga AA5052 abaixou sua resistência à corrosão por pite enquanto que para liga AA5083 o potencial de pite aumentou devido à presença da solda.

A composição química da liga AA5356, que é a liga da solda do material AA5083, apresenta a seguinte composição química nominal: 94,6%Al - 0,12Mn - 5,0Mg - 0,12%Cr - 0,13%Ti. Uma explicação para a melhora da resistência à corrosão por pite pode estar relacionada com a presença de titânio, que é um metal muito resistente à corrosão em geral (ALONSO-FALLEIROS, N., 1997). Apesar desta liga conter elevado teor de Mg, tal como a liga AA5083, o titânio pode estar introduzindo um efeito benéfico que supera a perda de resistência à corrosão devida ao Mg.

5.4. Resultados da Influência do Tempo de Imersão no Eletrólito antes do Ensaio

Neste item variou-se o tempo de imersão no eletrólito (solução 3,5% NaCl) antes do início do ensaio. Este tempo era de 15 minutos para os ensaios, determinado anteriormente no item 5.1. Os tempos de imersão foram: 0 minutos, 30 minutos, 90 minutos (1,5 horas) e 1230 minutos (20,5 horas), todos ensaiados no metal base da liga AA5083.

As Figuras 5.14 e 5.15 mostram as curvas de polarização cíclica para 0 minutos de imersão:

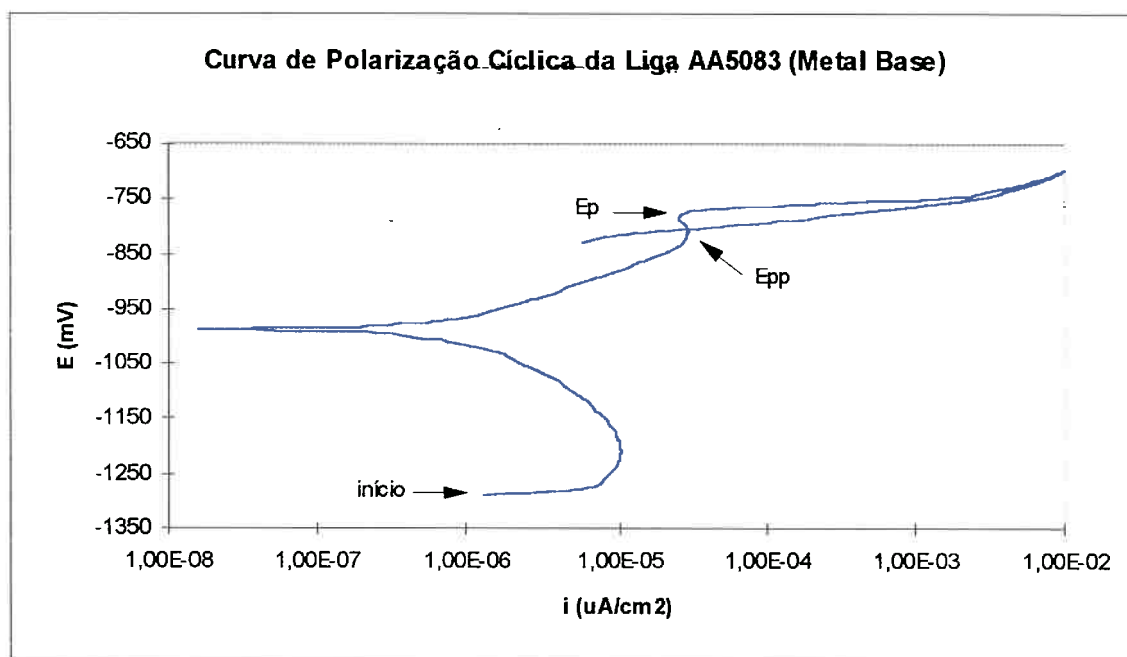


Figura 5.14- Curva de E x I da liga AA5083 para 0 min. de imersão no eletrólito antes de início do ensaio. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C, t inicial (imersão) = 0 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

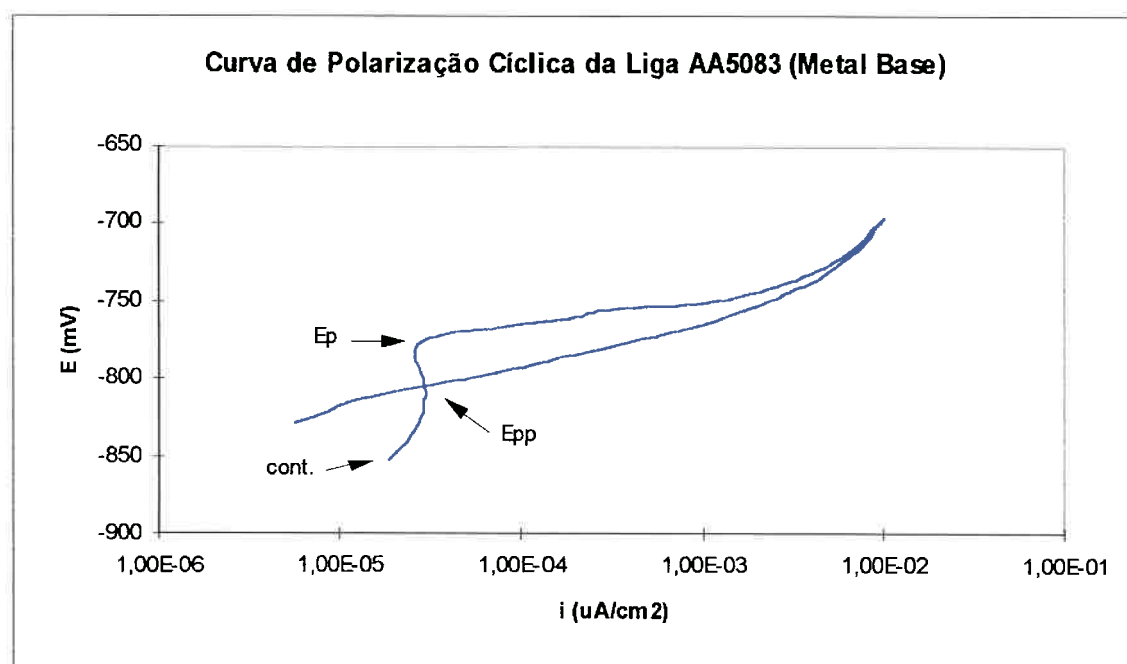


Figura 5.15 - Curva de E x I da liga AA5083 para 0 min. de imersão no eletrólito antes de início do ensaio (mesmo curva da Figura 5.14, só destacando a região do início do pite). Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C, t inicial (imersão) = 0 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

O potencial de pite (E_p) neste caso foi de aproximadamente -770 mV, muito próximo do valor de E_p obtido no item 5.2 (metal base da liga AA5083 - 15 min. de imersão) que foi de (-783 ± 19) mV, mostrando que não houve influência ao se iniciar o ensaio logo após a imersão. Contrariamente ao observado para o tempo de imersão de 15 min., aqui obteve-se o E_{pp} com valor elevado: -805 mV.

Na Figura 5.16 tem-se um tempo de imersão de 30 minutos.

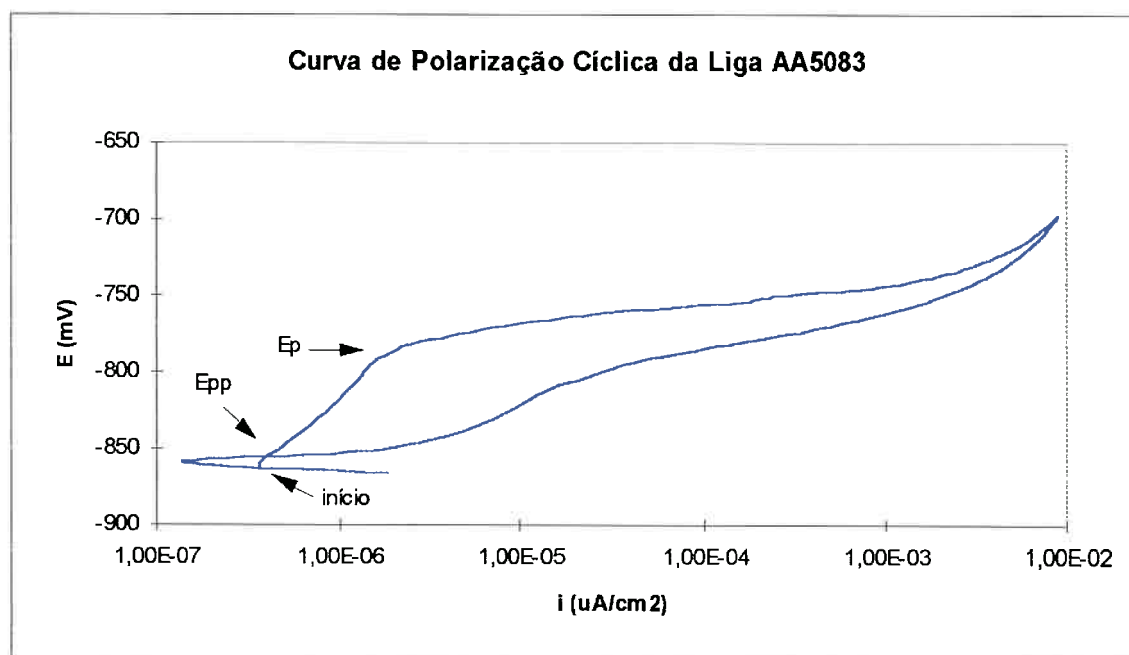


Figura 5.16 - Curva de $E \times i$ da liga AA5083 para 30 min. de imersão no eletrólito antes de início do ensaio. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C, t inicial (imersão) = 30 min.- velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

O potencial de pite (E_p) neste caso foi de aproximadamente -785 mV, muito próximo do valor de E_p obtido no item 5.2 (metal base da liga AA5083 - 15 min. de imersão) que foi de (-783 ± 19) mV, mostrando que também não houve influência ao se iniciar o ensaio logo após 30 minutos de imersão. O potencial de proteção (E_{pp}) foi de aproximadamente -885 mV, que é um valor praticamente igual ao potencial de corrosão.

Na Figura 5.17 tem-se um tempo de imersão de 90 minutos.

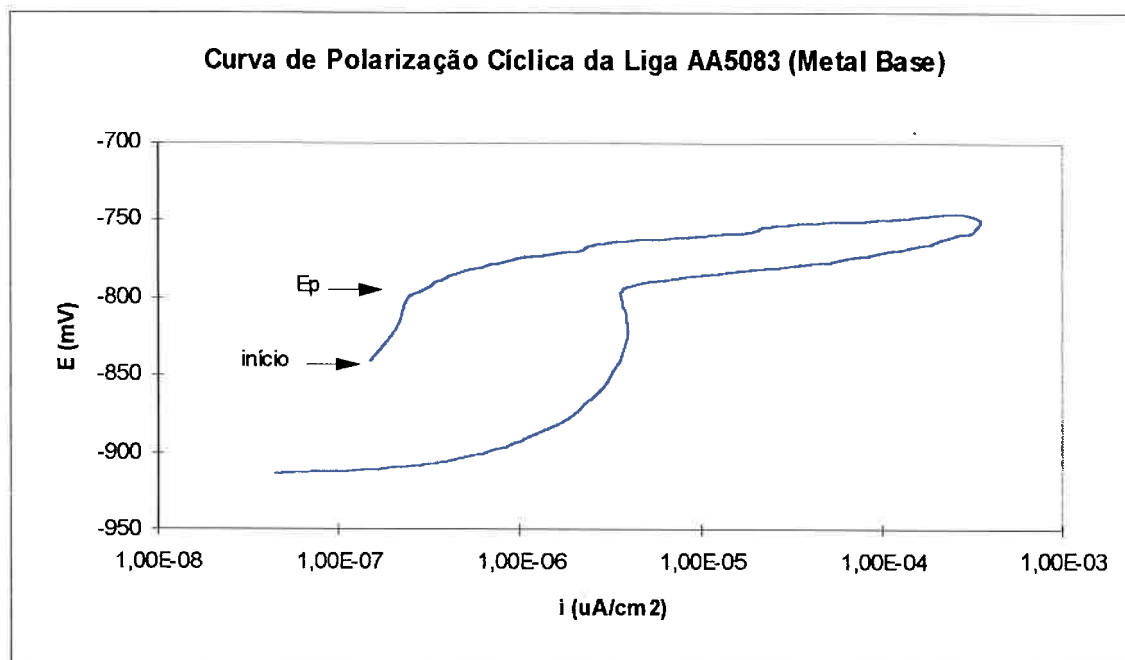


Figura 5.17 - Curva de E x I da liga AA5083 para 90 min. de imersão no eletrólito antes de início do ensaio. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C, t_{inicial} (imersão) = 90 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

O potencial de pite (E_p) neste caso foi de aproximadamente -780 mV, também muito próximo do valor de E_p obtido no item 5.2 (metal base da liga AA5083 - 15 min. de imersão) que foi de (-783 ± 19) mV, mostrando que também não houve influência ao se iniciar o ensaio logo após 90 minutos de imersão. Por sua vez, não se pode determinar o potencial de proteção (E_{pp}).

Na *Figura 5.18* tem-se um tempo de imersão de 1230 minutos.

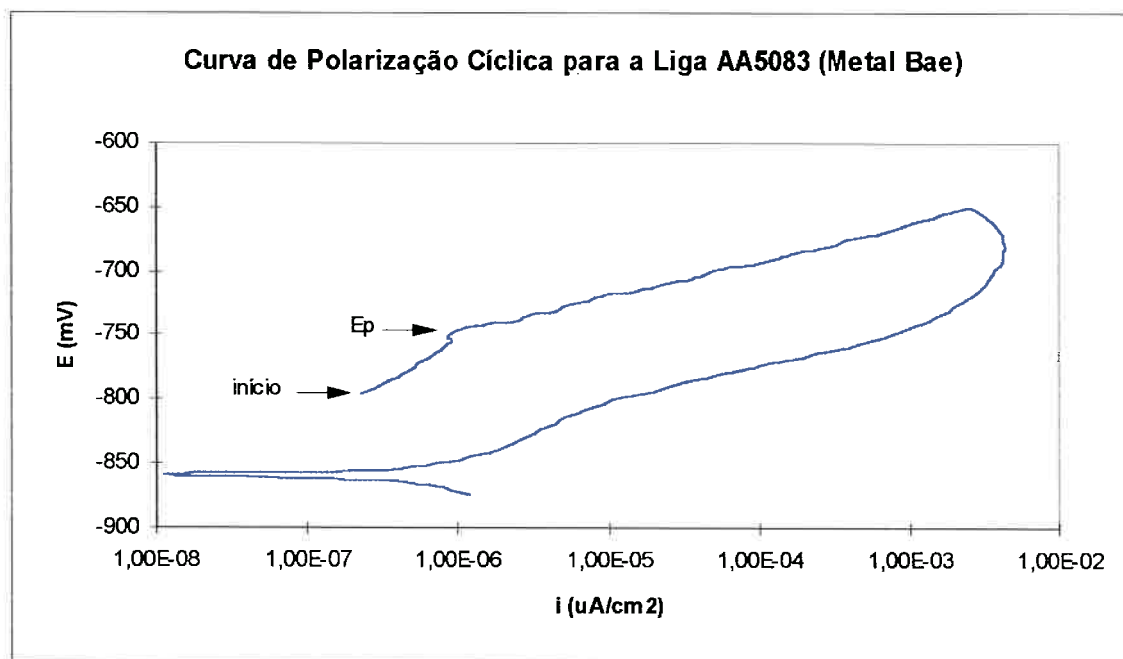


Figura 5.18 - Curva de $E \times i$ da liga AA5083 para 1230 min. (20,5 horas) de imersão no eletrólito antes de início do ensaio. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C , t inicial (imersão) = 1230 min - velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

Neste caso, ao contrário dos anteriores, o potencial de pite (E_p) foi de aproximadamente -740 mV, acima do valor de E_p obtido no item 5.2 (metal base da liga AA5083 - 15 min. de imersão) que foi de (-783 ± 19) mV, apresentando assim uma resistência maior à corrosão por pite. Não se pode também determinar o potencial de proteção (E_{pp}).

A Figura 5.19 mostra as curvas para todos os tempos de imersão no eletrólito (0 min., 15 min., 30 min., 90 min. e 1230 min.).

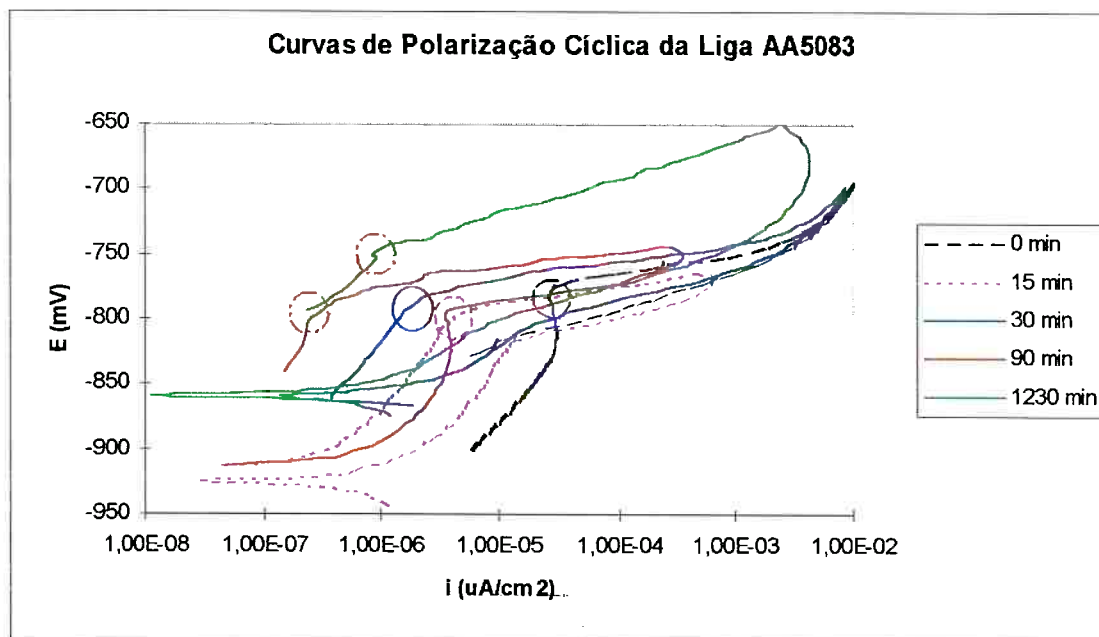


Figura 5.19 - Curvas de E x I da liga AA5083 para diferentes tempos de imersão no eletrólito antes de início do ensaio. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 23°C, t inicial (imersão) = legenda - velocidade de varrimento 1,0 mV/s. As regiões no círculo representam os potenciais de pite de cada curva.

Pode-se observar na *Figura 5.19* que a única curva que mostrou diferença foi a de tempo igual a 1230 minutos (20,5 horas) sendo que os outros casos o potencial de pite ficou no mesmo patamar. Curiosamente, para 0 min. de imersão o material apresenta E_{pp} elevado e para qualquer outro tempo de imersão não se tem a ocorrência de E_{pp} .

5.5. Resultados da Influência da Temperatura

Verificou-se o efeito da temperatura realizando um ensaio com o eletrólito a 40 °C. O resultado encontra-se na *Figura 5.19*. A *Figura 5.21* mostra as duas curvas juntas, uma com solução a 23 °C e a outro a 40 °C.

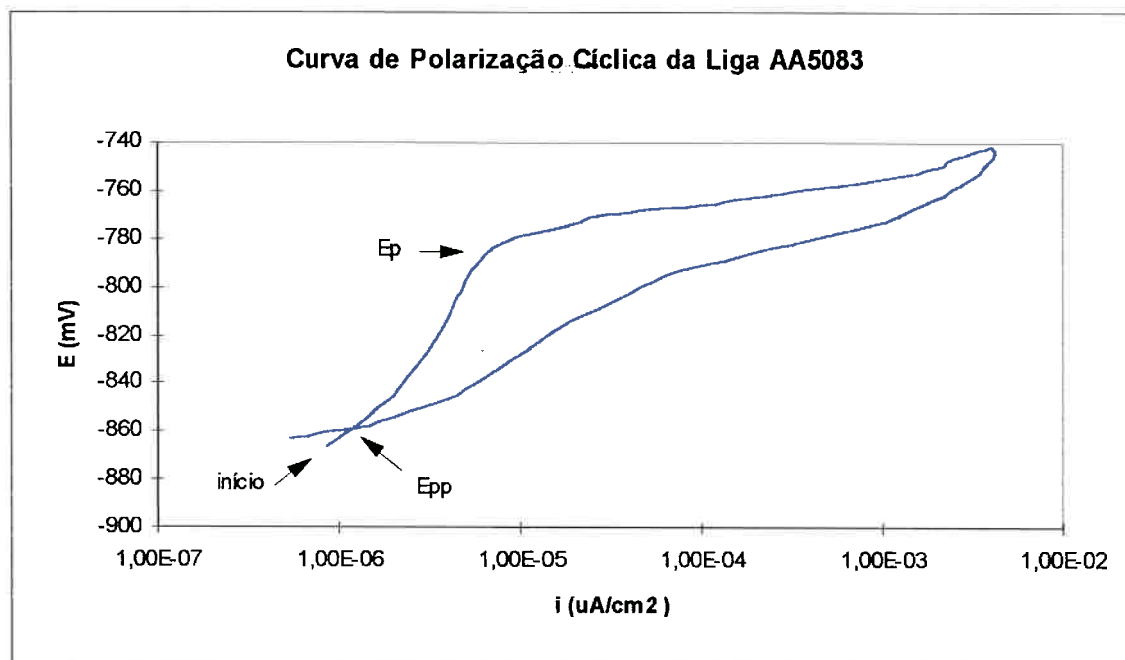


Figura 5.20 - Curvas de $E \times i$ da liga AA5083 com solução a 40°C . Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 40°C , t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento $1,0\text{ mV/s}$.

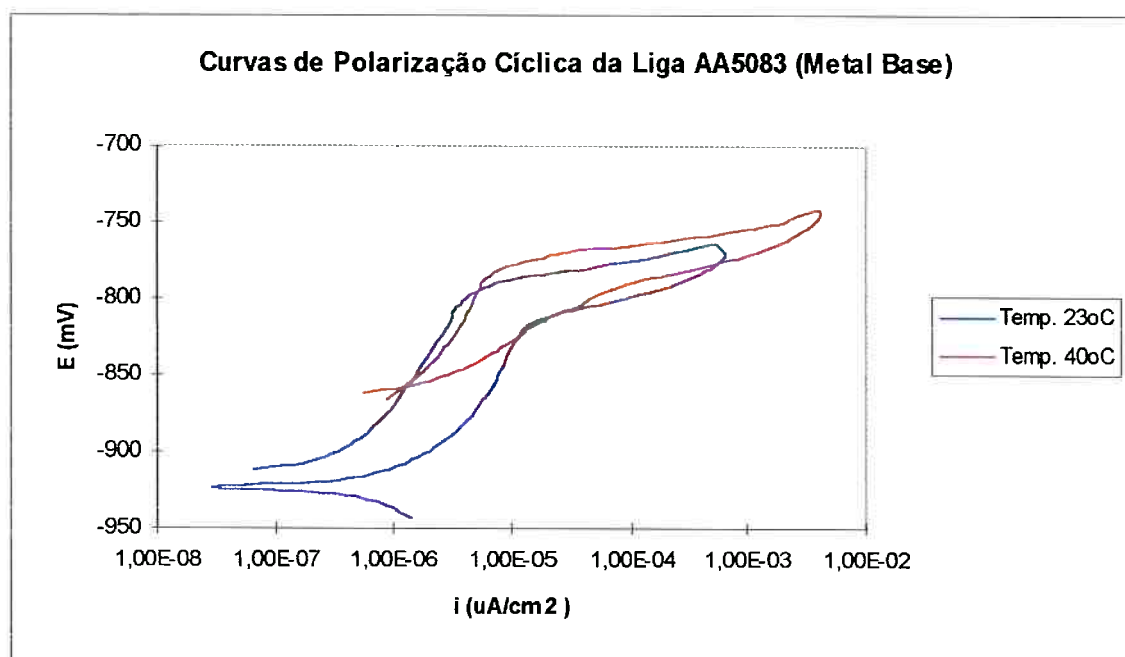


Figura 5.21 - Curvas de $E \times i$ da liga AA5083 com diferentes temperaturas da solução. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - legenda, t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento $1,0\text{ mV/s}$.

O efeito da mudança de temperatura para 40 °C não levou à uma mudança no potencial de pite (E_p) que ficou num valor proximado de -785 mV contra o valor médio de (-783 ± 19) mV do item 5.2 para uma temperatura da solução de 23 °C.

A influência da temperatura no potencial de pite (E_p) do alumínio foi estudado por Böhni e Uhlig, Hoar, e Broli e Holtan (SZKALARSKA-SMILLOSKA, Z., 1986). Nestes estudos notou-se apenas uma pequena variação no potencial de pite numa faixa de temperatura entre 0 e 40 °C, fato este que se pode observar também neste caso (*Figura 5.20*).

Por outro lado, a temperatura de 40°C elevou consideravelmente o potencial de corrosão da liga AA5083.

5.6. Resultados da Influência do Tempo de Exposição ao Ar Antes da Imersão

Variou-se aqui o tempo de exposição ao ar após o lixamento do corpo-de-prova.

Trabalhou-se com 20 horas e 20 dias após o lixamento. Os resultados da liga AA5052 encontram-se na *Figura 5.22* e da liga AA5083 na *Figura 5.23*.

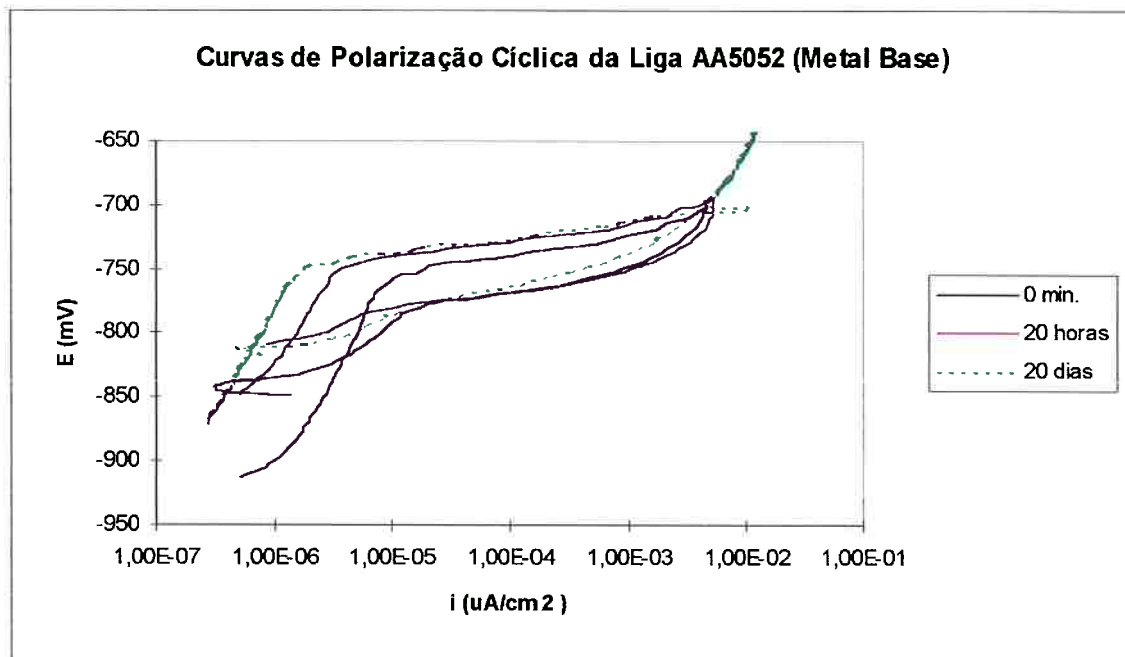


Figura 5.22 - Curvas de E x I da liga AA5052 com diferentes tempos de exposição ao ar após o lixamento. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - legenda, t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

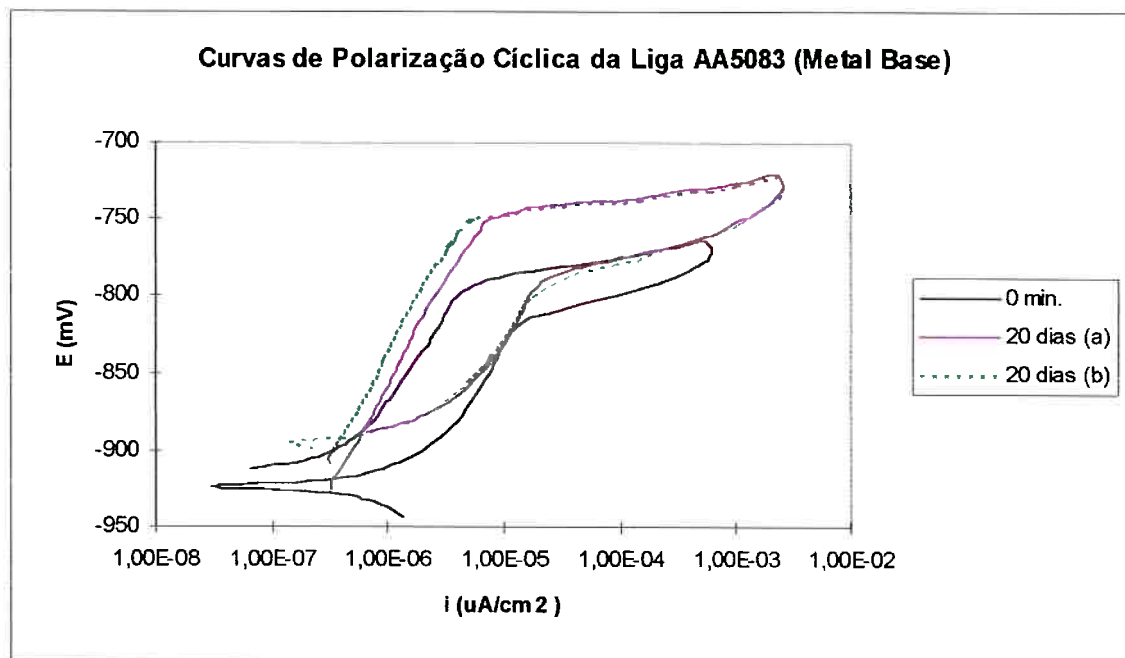


Figura 5.22 - Curvas de E x I da liga AA5083 com diferentes tempos de exposição ao ar após o lixamento. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - legenda, t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento 1,0 mV/s.

Observou-se que para a liga AA5052 não houve grandes diferenças no potencial de pite (E_p) para os diferentes tempos de exposição ao ar após o lixamento (imersão imediata, 20 horas de exposição e 20 dias de exposição), todos eles ficando perto de -750 mV. Portanto, para a liga AA5052, a variação no tempo de exposição ao ar não chegou a afetar a resistência à corrosão por pite.

Já para a liga AA5083, houve uma pequena variação. Para os dois casos de 20 dias de exposição ao ar após o lixamento ((a) e (b)), o potencial de pite (E_p) ficou próximo de -750 mV, enquanto que com a imersão imediata após o lixamento, e potencial de pite é de (-783 ± 19) mV (item 5.2).

5.7. Resultados da Influência da Condição Superficial do Material

Neste caso estudou-se a influência da condição superficial do material no potencial de pite. Para isto realizou-se um ensaio com um corpo-de-prova polido (até $1\mu\text{m}$) e o resultado é mostrado nas Figuras 5.23 e 5.24.

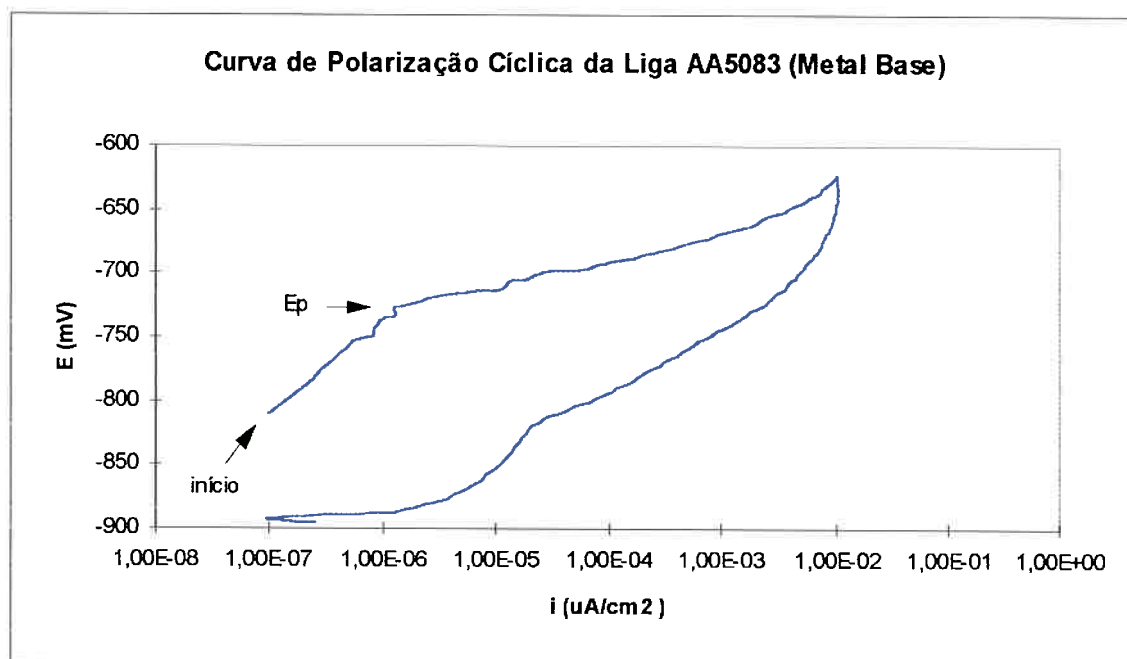


Figura 5.23 - Curva de $E \times I$ da liga AA5083 com superfície polida até $1 \mu\text{m}$. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 22°C , t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento $1,0 \text{ mV/s}$.

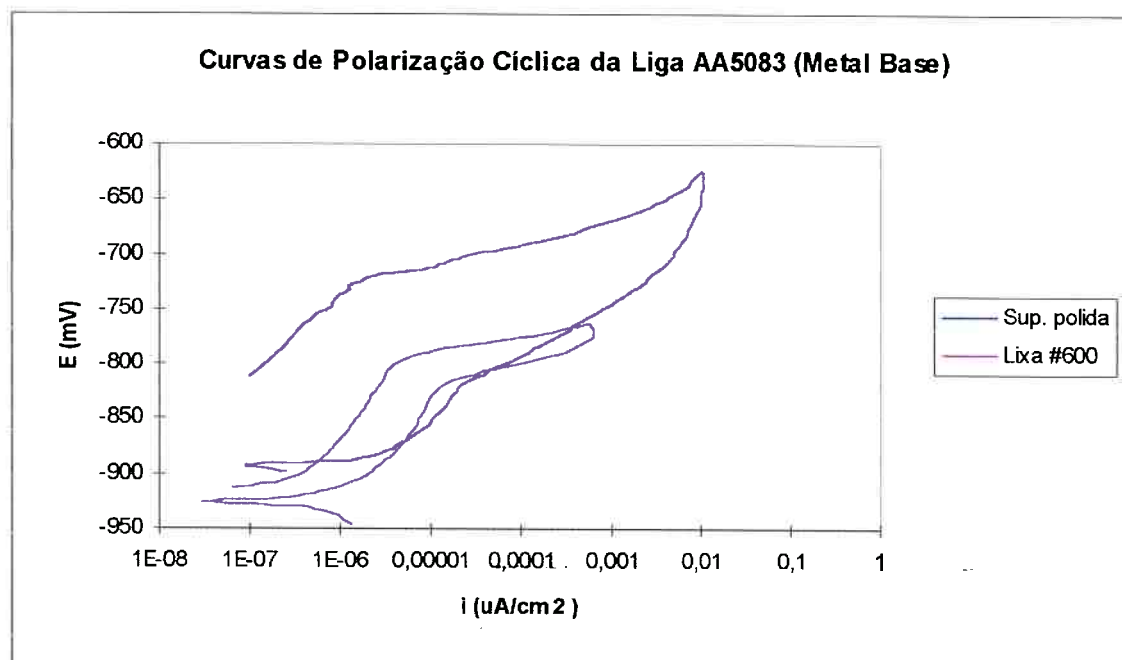


Figura 5.24 - Curva de $E \times I$ da liga AA5083 variando-se a condição superficial do material. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 22°C , t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento $1,0 \text{ mV/s}$.

Pode-se observar que o corpo-de-prova com a superfície polida apresentou melhor resistência à corrosão por pite, com um potencial de pite (E_p) de aproximadamente -730 mV ao se comparando com E_p de $(-783 \pm 19) \text{ mV}$ (item 5.2) que era lixado com lixa #600.

O estado da superfície do metal é conhecido por afetar a susceptibilidade ao pite. Quanto mais homogênea for a superfície, tanto quimicamente como fisicamente, maior é o potencial de pite, menor o número de pites, e melhor é a resistência do material ao pite. Quanto mais grosseira for a superfície, maior o número de locais fracos da camada protetiva do filme óxido, onde pode-se ocorrer uma concentração crítica de Cl^- , ou possuir heterogeneidades resultantes da preparação superficial do material. Todos estes fatores podem

aumentar o número de locais ativos para nucleação de pites (SZKALARSKA-SMILLOSKA, Z., 1986).

Com isso pode-se explicar o comportamento do potencial de pite (E_p) do material ensaiado que foi polido, ou seja, com a maior homogeneidade da superfície, melhor sua resistência à corrosão por pite.

5.8. Resultado da Influência da Velocidade de Varrimento

Procurou-se verificar a influência da velocidade de varrimento do ensaio. Para isto ensaiou-se um corpo-de-prova da liga AA5052 com uma velocidade de varrimento de 0,5 mV/s. O resultado é mostrado na *Figura 5.25*.

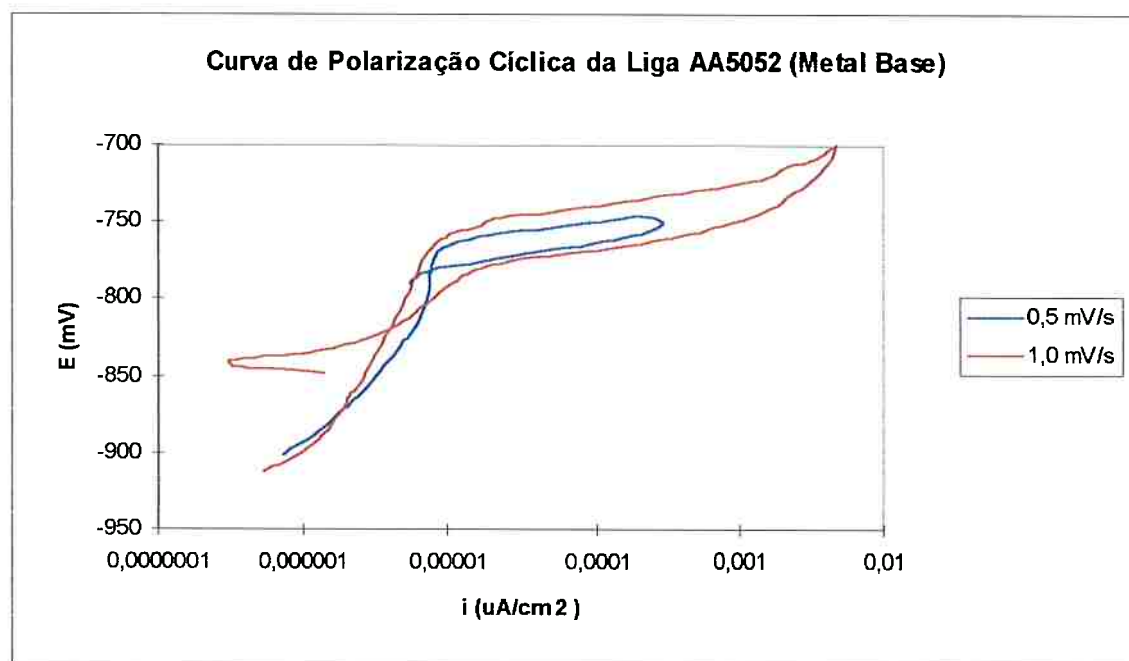


Figura 5.25 - Curvas de $E \times I$ da liga AA5052 variando-se a velocidade de varrimento. Condições: solução - NaCl 3,5%, temperatura - 22 °C, t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento - legenda.

Observando-se a *Figura 5.25*, notou-se que o potencial de pite (E_p) do corpo-de-prova ensaiado com velocidade de varrimento 0,5 mV/s. não sofreu alterações

em relação ao ensaiado com 1,0 mV/s. As únicas pequenas mudanças foram na forma da curva e num potencial de proteção (E_{pp}) um pouco maior para a o material ensaiado, mas que deve ser consequencia da corrente de reversão menor e não da velocidade de varrimento.

5.9. Resultado da Influência de Sulfato de Sódio na Solução

Neste caso estudou-se a influência da adição de sulfato de sódio à solução de 3,5% NaCl. Para isto trabalhou-se com duas soluções (3,5% NaCl + 3,5% Na₂SO₄ e 3,5% NaCl + 3,5% Na₂SO₄).

A Figura 5.26 mostra as curvas da liga AA5052 com solução 3,5% NaCl + 3,5% Na₂SO₄.

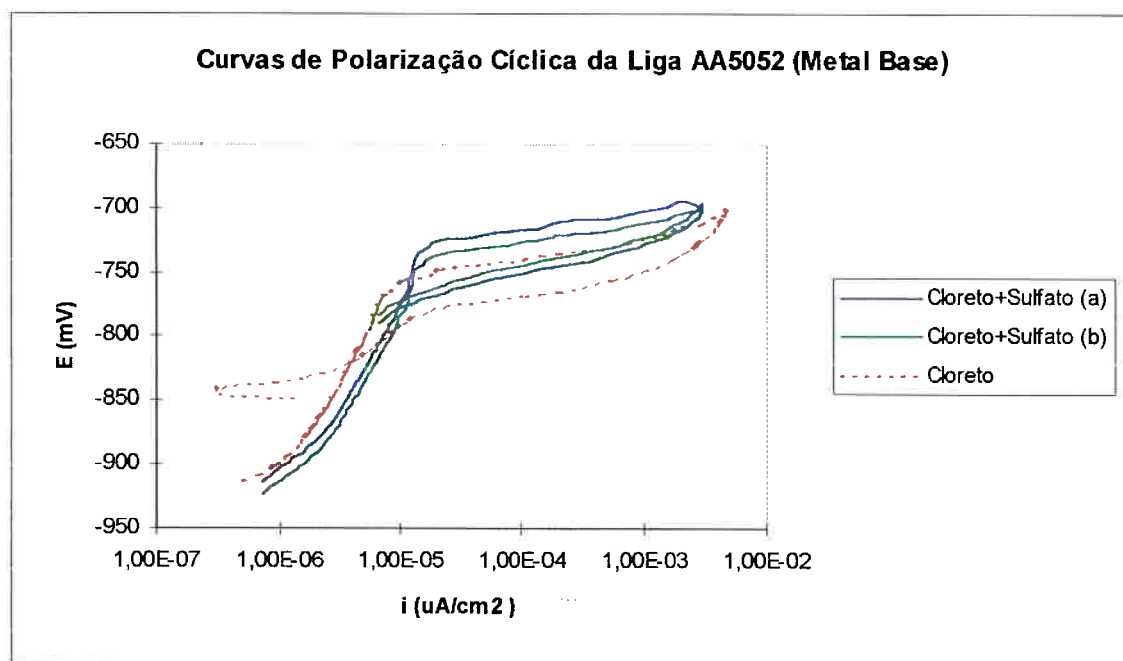


Figura 5.26 - Curvas de $E \times I$ da liga AA5052 variando-se a solução. Condições: solução - NaCl 3,5% + Na₂SO₄ 3,5%, temperatura - 22 °C, t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento - 1mV/s. Obs: (a) e (b) foram 2 corpos-de-prova diferentes ensaiados e a curva pontilhada (cloreto) foi a ensaída com solução 3,5% NaCl.

Como pode-se observar, a adição de sulfato de sódio elevou o potencial de pite (E_p) para um valor aproximado de -730 mV.

A Figura 5.27 mostra as curvas da liga AA5052 só que com solução 3,5% NaCl + 7,0% Na₂SO₄.

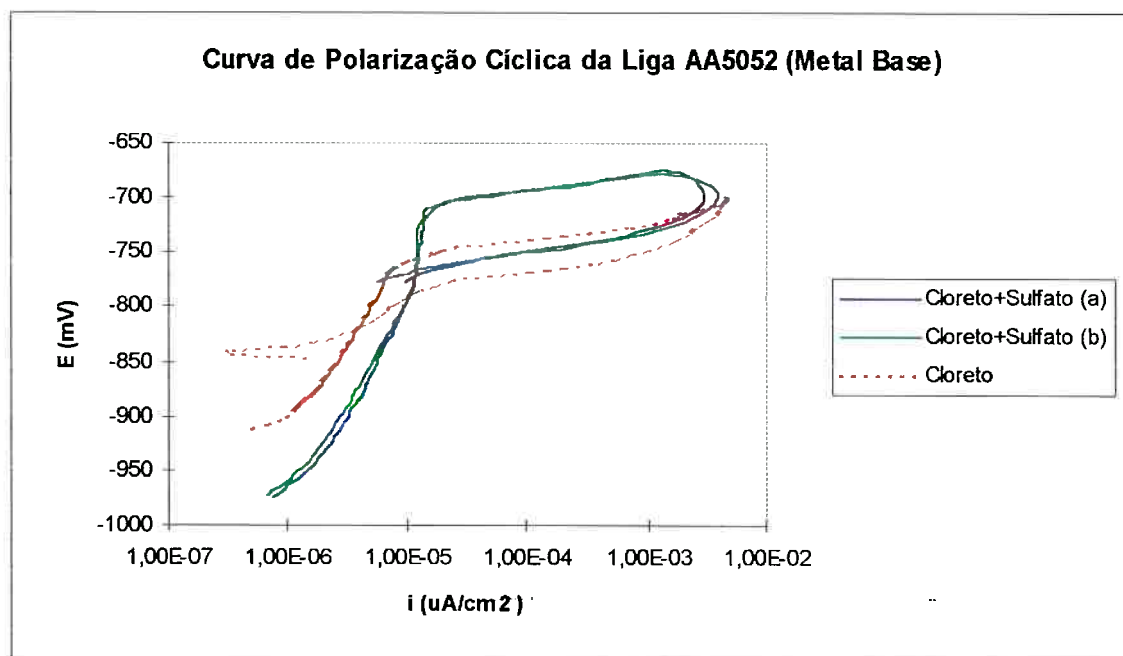


Figura 5.27 - Curvas de E x I da liga AA5052 variando-se a solução. Condições: solução - NaCl 3,5% + Na₂SO₄ 7,0%, temperatura - 23 °C, t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento - 1mV/seg. Obs: (a) e (b) foram 2 corpos-de-prova diferentes ensaiados e a curva pontilhada (cloreto) foi a ensaída com solução 3,5% NaCl.

A Figura 5.28 mostra as curvas das 2 concentrações de sulfato de sódio juntas.

As legendas são as seguintes:

1:1 = 3,5% NaCl + 3,5% Na₂SO₄

1:2 = 3,5% NaCl + 7,0% Na₂SO₄

cloreto = 3,5% NaCl

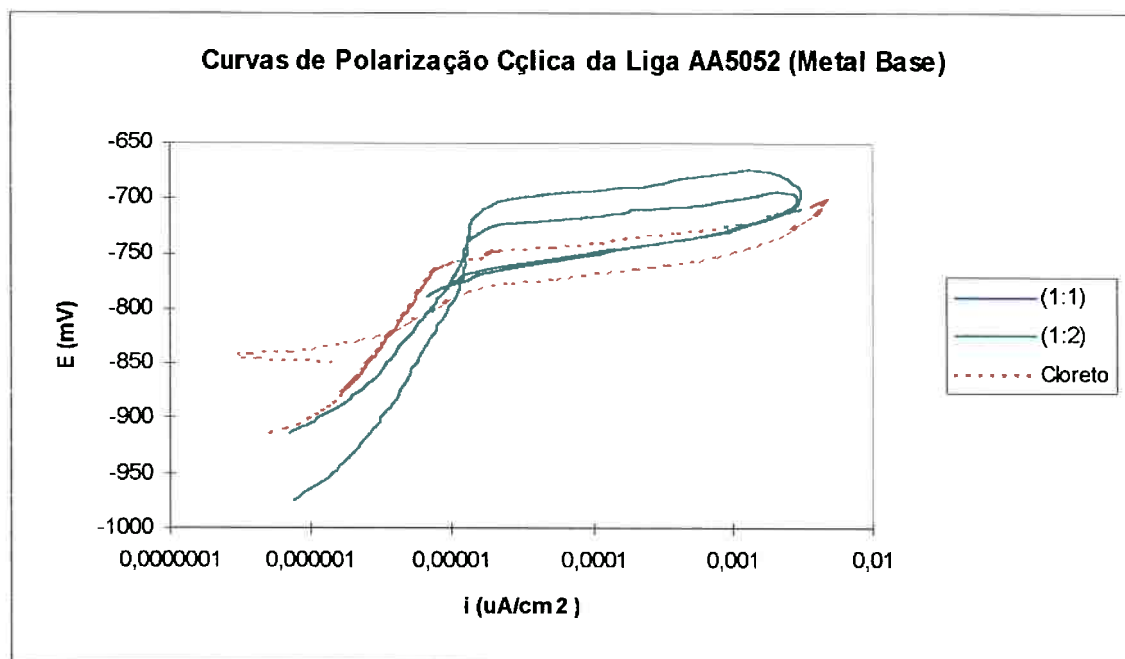


Figura 5.28 - Curvas de E x I da liga AA5052 variando-se a solução. Condições: solução - legenda, temperatura - 23 °C, t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento - 1mV/seg.

Pode-se observar que quanto maior a concentração de sulfato de sódio, maior o potencial de pite da liga.

A Figura 5.29 mostra as curvas da liga AA5083 com solução 3,5% NaCl + 3,5% Na₂SO₄.

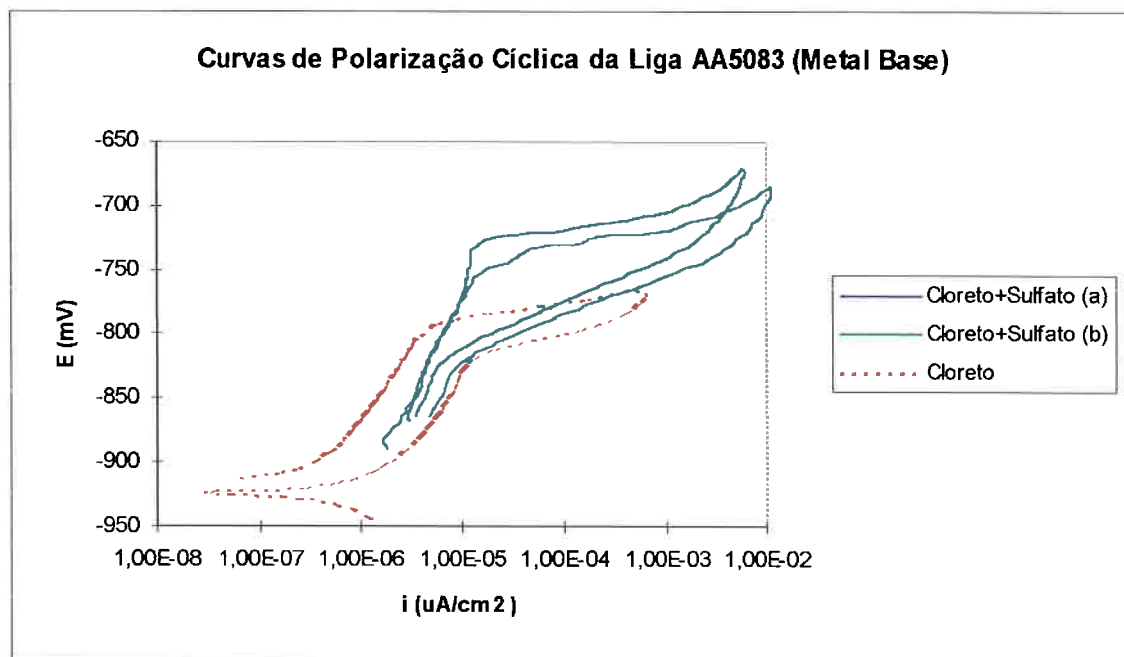


Figura 5.29 - Curvas de E x I da liga AA5083 variando-se a solução. Condições: solução - NaCl 3,5% + Na₂SO₄ 3,5%, temperatura - 22 °C, t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento - 1mV/s. Obs: (a) e (b) foram 2 corpos-de-prova diferentes ensaiados e a curva pontilhada (cloreto) foi a ensaída com solução 3,5% NaCl.

Pode-se observar também que a adição de sulfato de sódio elevou o potencial de pite (E_p) para um valor aproximado de -740 mV.

A Figura 5.30 mostra as curvas da liga AA5083 só que com solução 3,5% NaCl + 7,0% Na₂SO₄.

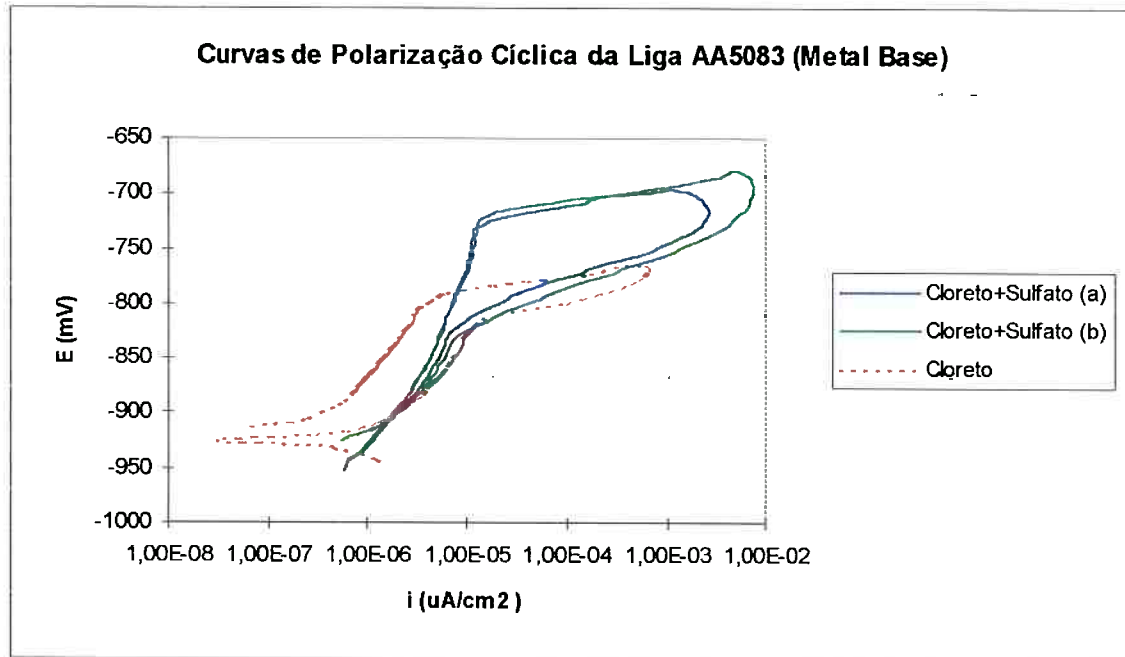


Figura 5.30 - Curvas de $E \times i$ da liga AA5083 variando-se a solução. Condições: solução - NaCl 3,5% + Na_2SO_4 7,0%, temperatura - 23. °C, t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento - 1mV/seg. Obs: (a) e (b) foram 2 corpos-de-prova diferentes ensaiados e a curva pontilhada (cloreto) foi a ensaída com solução 3,5% NaCl.

A Figura 5.31 mostra as curvas das 2 concentrações de sulfato de sódio juntas.

As legendas são as seguintes:

1:1 = 3,5% NaCl + 3,5% Na_2SO_4

1:2 = 3,5% NaCl + 7,0% Na_2SO_4

cloreto = 3,5% NaCl

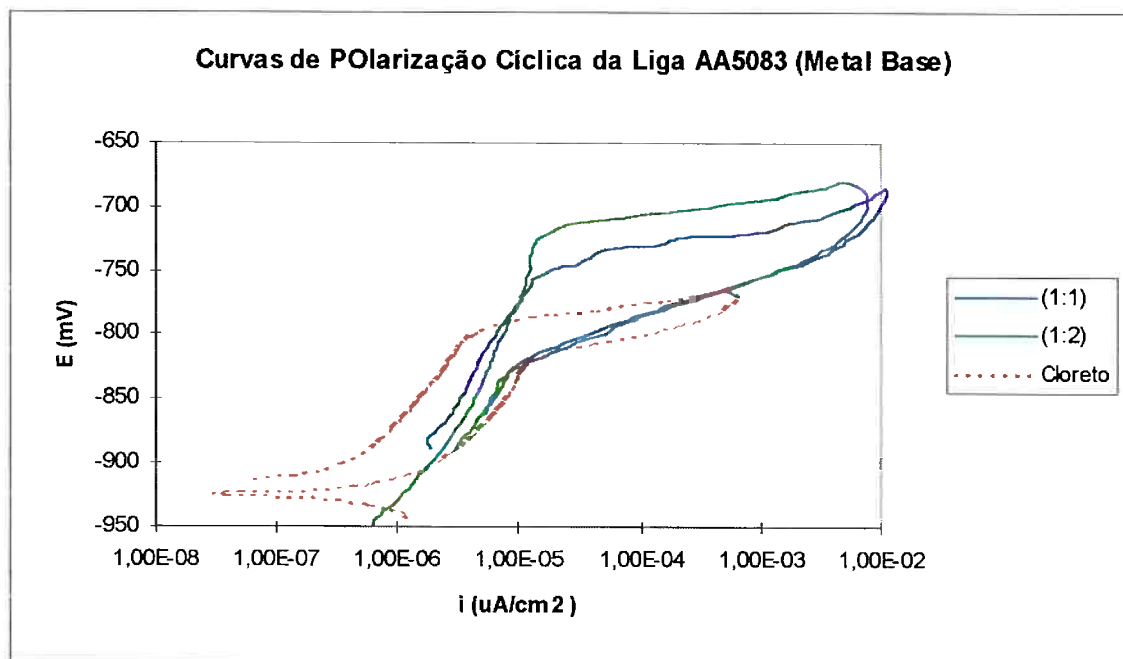


Figura 5.31 - Curvas de E x I da liga AA5083 variando-se a solução. Condições: solução - legenda, temperatura - 23 °C, t inicial (imersão) = 15 min. - velocidade de varrimento - 1mV/s.

Pode-se observar novamente que quanto maior a concentração de sulfato de sódio, maior o potencial de pite da liga. Isto ocorre pelo fato do sulfato de sódio ser um inibidor para a formação de pites (SZKALARSKA-SMILLOSKA, Z., 1986).

Os mecanismos de inibição de pites podem ser variar de acordo com o inibidor e o metal, mas em geral, dois mecanismos podem ser distinguidos: (a) adsorção competitiva e (b) reparo do filme protetor na superfície do metal.

De acordo com a primeira alternativa (a), a concentração de ânions adsorvidos na superfície do metal na presença de um inibidor diminui em consequência da competição entre o ânion agressivo (Cl^-) e o não agressivo (SO_4^{2-}) na superfície. A evidência da ocorrência dessa adsorção competitiva entre Cl^- e SO_4^{2-} ou OH^- foi estudada por Rozenfeld e Maksimchuk (SZKALARSKA-SMILLOSKA, Z., 1986).

Esta evidência pode ser observada tanto para a liga AA5052 (Figura 5.28) quanto para a liga AA5083 (Figura 5.31), pois quanto maior era a concentração de sulfato de sódio, maior era o potencial de pite (E_p), ou seja, o sulfato estava competindo com o cloreto para a adsorção na superfície do metal.

6. Conclusão

As principais conclusões deste trabalho foram:

1. A liga AA5083 mostrou-se mais sensível às variáveis examinadas do que a liga AA5052. no entanto, mesmo nos casos onde foi observada uma variação da variação da resistência à corrosão por pite esta não foi muito acentuada, podendo-se dizer que, de modo geral, as duas ligas são bastante estáveis frente às variáveis estudadas.
2. A liga AA5052 é mais resistente à corrosão por pite do que a liga AA5083, pois a liga AA5052 apresentou maior potencial de pite e potencial de proteção definido (o que não ocorreu com a liga AA5083).
3. Provavelmente, a melhor resistência à corrosão da liga AA5052 deve-se ao menor teor de magnésio em sua composição química.
4. A presença de solda na liga AA5052 (solda de AA5052) não alterou o valor do potencial de pite desta liga. No caso da liga AA5083 (solda de AA5653) observou-se um aumento do potencial de pite. Talvez a presença de titânio na composição química da liga AA5653 empregada para a solda explique esta maior resistência à corrosão observada.
5. O tempo de imersão foi estudado para a liga AA5083 constatando-se que para tempos muito longos de imersão (1230 min.) o potencial de pite sofre um aumento. Por outro lado, seu efeito sobre o potencial de proteção para se oposto, pois a 0 min de imersão a liga AA5083 apresentou definição do potencial de proteção, enquanto que para qualquer outro tempo de imersão não houve definição deste parâmetro. Portanto, se por um lado obteve-se um aumentada resistência à nucleação de pite com o tempo de imersão a capacidade do material à repassivação parece ter diminuído.

6. o aumento da temperatura para 40 °C não alterou o potencial de pite da liga AA5083, mas aumentou significativamente o seu potencial de corrosão.
7. A exposição ao ar originou potenciais de pite maiores para a liga AA5083, enquanto que para a liga AA5052 não houve alteração.
8. O potencial de pite e o potencial de corrosão da liga AA5083 aumentaram quando se passou do acabamento superficial de lixa #600 para o de polimento metalográfico.
9. A velocidade de varrimento do potencial não influenciou os valores de potenciais de pite obtidos.
10. A adição de íons sulfato atuou como inibidor da corrosão por pite destas ligas, aumentando o potencial de pite das duas ligas estudadas.

7. Referências Bibliográficas

- ALONSO-FALLEIROS, N., Comunicação pessoal, 1997.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, 10th edition, Vol 2, p 91-93; 97, 1990.
- FINARDI, Apostila: p 142-146;172-176
- FONTANA, M. G., GREENE, N. D., 2nd edition, New York 1978, p. 49-59.
- GUIA TÉCNICO DO ALUMÍNIO; São Paulo, 1994, 1^a Ed., Vol 02, p. 9-12.
- METALS HANDBOOK, 9th edition, Vol 13 p, 583-585, 1957.
- MONDOLFO. L. F. Aluminum Alloys: Structure and Properties London-Boston Butterworths. 1976, pp 787-797;
- MONTE, M. B. M; ADAMIAN, R. Panorama do Mercado Mundial de Alumínio: perspectivas e oportunidades para o metal e suas ligas. *Metalurgia & Materiais*, São Paulo, v.51, n.443, p. 600-610), Jul 1995.
- SAATCHI, A.; GOLOZAR, M. A.; MOZAFARINIA, R., Evaluation of Alluminum alloy 5083 Weldments to Stress Corrosion Cracking in Seawater, Industrial Corrosion and Corrosion Control Technology, p301-310, 1996.
- SZKALARSKA-SMIALOWSKA, Z., Pitting Corrosion of Metals, p.223-224, 241, 281, 297-298; Houston, 1986.
- SCULLY, J.C., The Fundamentals of Corrosion, U.K., 1989 p.167-177.

Agradecimentos,

Gostaria de agradecer a colaboração da orientadora Neusa Alonso-Falleiros, sem a qual não teria sido possível a realização deste trabalho.