

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Corrosão de grades de liga de Pb/Ca/Sn de placas positivas de Baterias de Chumbo-Ácido

Gilberto A. de O. Brito¹, Carlos V. D'Alkaine²

Abstract

They are presented and discussed the results about the corrosive process of a lead alloy immersed in sulfuric acid with the aim of developing a test to study the corrosion resistance of these kinds of alloys. The used methodology was the performance of anodic/cathodic cycles of voltammetries of a Pb/Ca/Sn alloy in H₂SO₄ 4,6 M solution in the potential range where this alloy works like a grid of a positive lead-acid battery electrode. In every given number of cycles the voltammetry was registered to follow the evolution of the anodic and cathodic peak current densities. In every given number of cycles the work electrode was removed of the test system, washed, dried, weighted and then reintroduced in the test system. The voltammetries showed an anodic peak and a cathodic one, both related. The values of peak current densities for both peaks pass for a maximum with increasing number of cycles, and then, for a great number of cycles, they show a small increase. The remove of the electrode to weight didn't show any influence in the aging process of the corrosion. During the initial cycles, the anodic peak had current densities greater than the cathodic peak ones but, for great number of cycles, after peaks reach their maximum, these anodic and cathodic peak current densities tend to be practically the same, inside the experimental error. The mass of the thread of Pb/Ca/Sn grid increases with the number of cycles, passing for a maximum about 11500 cycles, and accelerating this increase in the final of the experiments. All these results are analyzed and explanations for them are proposed.

Resumo

São apresentados e discutidos resultados sobre o processo corrosivo de uma liga de chumbo mergulhada em ácido sulfúrico com o intuito de desenvolver um teste para estudar a resistência a corrosão deste tipo de ligas. A metodologia utilizada foi a da realização de ciclos anódicos/catódicos de voltametrias de uma liga de Pb/Ca/Sn em solução de H₂SO₄ 4,6 M na zona de potenciais onde atua como grade do eletrodo positivo das Baterias de Chumbo-Ácido. A cada certo número de ciclos, a voltametria era registrada para poder seguir-se a evolução das densidades de corrente de pico anódicas e catódicas. A cada certo número de ciclos, o eletrodo de trabalho era retirado do sistema de teste, enxaguado, seco e pesado, sendo logo re-introduzido no sistema de teste. As voltametrias mostraram um pico anódico e um catódico, relacionados. Os valores de densidade de corrente de pico, para ambos os picos, passam por um máximo ao aumentar o número de ciclos, para logo, para grande número de

¹ Doutor, Professor – Departamento de Zootecnia, CCA, UFES

² Doutor, Professor – Grupo de Eletroquímica e Polímeros, DQ, UFSCar

ciclos, voltar a apresentar um ligeiro aumento. As retiradas do eletrodo de trabalho para pesagem não mostraram afetar o processo de envelhecimento da corrosão. Durante os ciclos iniciais, o pico anódico sempre possuiu densidade de corrente maior que a do pico catódico, mas para grande número de ciclos, após que os picos passam pelo seu máximo, estes picos de corrente anódica e catódica tendem a serem praticamente iguais, dentro do erro experimental. A massa do filete de grade de Pb/Ca/Sn aumenta com o número de ciclos, passando por um máximo em torno dos 11500 ciclos, e acelerando este aumento ao final dos experimentos. Todos estes resultados são analisados e propostas explicações para eles.

Palavras-chave: corrosão-passivação, grades positivas de Pb/Ca/Sn/Ag, desenvolvimento de teste, filmes de passivação, dirupção.

Introdução

O objetivo deste estudo é desenvolver uma metodologia eletroquímica para avaliação de ligas Pb/Ca/Sn/Ag frente à corrosão em H_2SO_4 . Estas ligas são atualmente usadas para grades de placas positivas de Baterias de Chumbo-Ácido, principalmente seladas.

Na composição Pb/Ca/Sn/Ag, o Ca assegura o endurecimento e a resistência mecânica para que a liga possa ser usada como grade de placas positivas de Baterias de Chumbo-Ácido. O Sn assegura que não se desenvolva com o uso da placa um filme de passivação não condutor eletrônico que desconectaria a grade do material ativo (PbO_2) da placa. A Ag asseguraria uma razoável resistência à corrosão sem que, durante o processo de cura, na manufatura da placa, a grade deixe de oxidar-se o suficiente para estabelecer uma boa aderência do material ativo à grade, após a formação do primeiro.

Um teste de corrosão deste tipo de grades é absolutamente necessário como critério de boa fabricação da grade, pois uma boa composição química média não é um critério. Que os diversos elementos micro-ligantes atuem na forma acima referida depende não só da composição, mas da forma em que esses elementos se encontram realmente na grade, tanto em sua distribuição química média na grade, mas também na forma em que está presente no material da grade. O Ca deve formar um precipitado de Pb_3Ca que assegure com sua distribuição o endurecimento e o ganho de resistência mecânica da liga, para o qual necessita dissolver-se na fase Pb até seu limite de solubilidade, homogeneamente. O Sn deve formar micro-fases de Sn para assegurar a saturação da fase Pb neste elemento e passar assim a formar parte homogeneamente dos filmes de passivação, assegurando que não se forme um filme eletronicamente não condutor que desconectaria a grade do material ativo durante o funcionamento da bateria. A Ag deve encontrar-se também homogeneamente distribuída na fase Pb, mas sem chegar a altas concentrações que inibiriam a corrosão necessária na etapa de cura da placa, para que durante a formação da mesma a grade fique realmente ligada ao material ativo formado. Todos estes requisitos são muito difíceis de medir de forma segura e representativa na produção das grades. Por isso no presente trabalho se propõe um procedimento alternativo baseado no desenvolvimento de um teste que avalie a possibilidade de resistência à corrosão da liga utilizada tal como realmente produzida. Nesse sentido, são apresentados os resultados para o caso de uma dos tipos de ligas usados que mostram a possibilidade do desenvolvimento do teste.

Revisão bibliográfica / Resultados / Discussão

Revisão Bibliográfica

Nesta parte do texto faremos uma breve resenha do estado dos conhecimentos dos filmes de passivação sobre Pb e em especial sua ligas de Ca/Sn.

Em condições potencioestáticas, tem-se defendido a idéia de que a corrosão das ligas de Pb/Ca/Sn é intergranular [1]. Isto seria o que explica porque se encontre maior corrosão quanto menor o tamanho de grão de Pb na liga, no caso de baterias em flutuação de potencial. Em condições potencioestáticas, a perda de massa medida por dissolução dos produtos de corrosão passa por um máximo para 1,3% de Sn. Por outro lado, uma camada de PbO enriquecida com Sn parece ter sido detectada entre a liga e o produto de corrosão de PbO₂ assegurando que não se forme uma camada compacta e não condutora eletrônica de PbO nesta região [2]. Para isso o mínimo em conteúdo de Sn deve ser de 0,6% em peso [3].

Muitas vezes a referência à estrutura do filme de passivação se vê complicada pelo fato de que não se especifica a região de potenciais que se considera e/ou o tipo de método eletroquímico utilizado quando é bem sabido que os filmes de passivação podem depender grandemente do potenciais nos quais foram crescidos e das técnicas usadas para o crescimento (galvanostáticas, potencioestáticas ou voltamétricas) assim como de suas espessuras. No caso de referência, o Pb ou suas ligas e na zona de potenciais onde atua a placa positiva das baterias de Chumbo-Ácido, tem-se afirmado [4, 5] que o filme teria presente α -PbO₂ e sulfatos básicos, não deixando de formar-se, dependendo de outras condições, uma camada de PbO.

Nas placas dos novos tipos de baterias seladas sem manutenção, sabe-se que um mau desenho da metalurgia da grade de Pb/Ca/Sn causa deformação e crescimento da grade e isto leva a uma rápida perda da resistência mecânica da mesma [6]. Estes resultados foram os que levaram ao uso da Ag como aditivo micro-ligante para incrementar a resistência à corrosão [7]. Este metal se incorporaria em uma forma ainda não bem compreendida ao filme de passivação, melhorando a resistência à corrosão.

Em relação a filmes crescidos nas condições da voltametria cíclica, não se encontraram referências sobre suas características e propriedades.

Experimental

O eletrodo de trabalho foi uma barra da liga em estudo que apresentava seção cilíndrica na parte mergulhada na solução de corrosão e terminava em sua parte superior na forma de barra de seção retangular que não era mergulhada. A simplicidade desta configuração do eletrodo de trabalho permitiu que o processo corrosivo pudesse também ser seguido por pesagem. Esta configuração também permitiu sempre manter mergulhada a barra até a mesma posição (o ponto de transformação da barra de seção cilíndrica à retangular). A seção cilíndrica mergulhada submetida ao processo de corrosão apresentava inicialmente um diâmetro de 0,21 cm (área de 0,035 cm²) e um comprimento mergulhado de 1,85 cm. Isto significa que o volume total da amostra mergulhada e submetida à corrosão em sua superfície de contato barra/solução foi inicialmente de 0,0647 cm³ e sua superfície de 1,26 cm². A liga estudada neste primeiro trabalho foi uma liga de Pb/Ca 0,14%/Sn 0,9%/Ag 0,15% especialmente desenhada para ser usada em uma bateria a ser submetida a ciclos de carga/descarga.

Como método de medida da resistência à corrosão da liga utilizada se propõe sua submissão, como eletrodo de trabalho não incluído, a um processo equivalente de corrosão ao que estará sujeita quando usada nas grades positivas de baterias de Chumbo Ácido. As grades acompanham nas Baterias os processos de carga/descarga e com isso ficam submetidas a ciclos

de varredura na solução da bateria (em geral H_2SO_4 4,6M) desde um potencial que na região em que o material ativo é PbO_2 até potenciais onde sobre a superfície do PbO_2 se forma PbSO_4 para logo, durante a carga, voltar-se aos potenciais mais anódicos iniciais onde o eletrodo volta à forma de PbO_2 . Sobre esta base se propõe submeter as grades das ligas que se queira testar a ciclos voltamétricos de varredura de potencial entre um potencial anódico máximo $E_{+\lambda}$, superior ao pico de passagem de PbSO_4 a PbO_2 , até um potencial catódico mínimo $E_{-\lambda}$ inferior ao pico de redução do PbO_2 a PbSO_4 . A idéia é com isto dar lugar, por redução do PbO_2 a PbSO_4 , e sua oxidação, em sucessivos ciclos, à formação/desaparição dos filmes de passivação sobre a superfície da grade. Este processo seria seguido tanto pelo valor da densidade de corrente do pico anódico, i_{pa} (de passagem do filme de PbSO_4 a PbO_2), quanto da densidade de corrente de pico catódico, i_{pc} (de formação sobre a superfície de PbO_2 de um filme de PbSO_4). Paralelamente, este processo de ciclagem seria seguido periodicamente pela evolução do peso total do eletrodo (incluía a parte não mergulhada e, por tanto, não corroída).

A solução utilizada nos testes foi a de H_2SO_4 4,6M sem desoxigenar (pois nos processos de oxidação se produz a evolução de oxigênio). O eletrodo de referência utilizado contra o qual estão dados todos os potenciais foi o de $\text{Hg}/\text{HgSO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$ 4,6M. O contra-eletrodo foi uma grade do mesmo material do eletrodo de trabalho envolvendo a barra do eletrodo de trabalho que ficava no centro para ter-se uma boa distribuição de corrente entre ambos. Todos os testes nesta etapa dos experimentos foram realizados a temperatura ambiente (25-30 °C). Os $E_{+\lambda}$ e $E_{-\lambda}$ utilizados para a solução e materiais considerados foram +0,7 e +1,3 Volts, respectivamente.

O teste proposto permite rapidamente chegar a grande número de ciclos que chamaremos de ciclos de carga/descarga e dos quais, sua influência tanto em i_{pa} quanto em i_{pc} e na massa da eletrodo de trabalho (m_{filme}) puderam facilmente ser seguidas.

Como equipamentos foram utilizados um potenciostato-galvanostato ELECTRARGEN, de fabricação própria, um gerador de funções PP RI HI-TEK e para o registro periódico das curvas corrente-potencial um registrador ECB RB400.

Resultados e Discussões

Na Fig. 1 se observa a evolução da densidade de corrente do pico anódico i_{pa} versus o número de ciclos. Nesta figura deve destacar-se não só que esta corrente passa por um máximo nos ciclos iniciais, mas que logo atinge um valor estacionário mínimo, a maior número de ciclos após o máximo. Finalmente, nos ciclos finais das experiências, parece voltar a subir lentamente. Paralelamente se constatou o fato de que as observações visuais do eletrodo de trabalho em sua parte mergulhada mostraram que até o máximo de i_{pa} a superfície mergulhada aparecia como preta.

A partir do máximo de i_{pa} esta superfície passou a ser cinza até que no ciclo aproximadamente 55.000, uma interrupção não prevista da corrente reativou o eletrodo (aumento momentâneo da i_{pa} na figura) fazendo com que o eletrodo voltasse a tornar-se preto. Este fato deve ser atribuído a que todo corte de força elétrica não prevista leva, na configuração e tipo de equipamentos usados, a que o eletrodo de trabalho fique submetido a um potencial de +1,3 Volts até que se ordene a reiniciação dos ciclos. Este potencial altamente oxidante evidentemente assegurou o retorno da coloração preta que logo deve ser atribuída à presença de um filme de PbO_2 por ser este o filme que cresce a estes altos sobrepotenciais. Finalmente, à continuação da experiência de ciclagem, após o corte não previsto da força elétrica, fez-se aparecer pouco a pouco uma coloração marrom na superfície do eletrodo. O retorno às condições da experiência (a ciclagem posterior ao corte não previsto de corrente), ao fazer que o preto tende-se a uma coloração marrom estaria

mostrando que novamente se desenvolve na superfície do eletrodo uma composição que asseguraria esta cor, possivelmente com a formação de alguma das formas de sulfatos de chumbo básicos (sulfato mono (1BS), tri (3BS) ou tetrabásico (4BS)). Isto justificaria a evolução para uma coloração marrom (mistura do preto do PbO_2 com distintos níveis de branco dos sulfatos básicos).

As retiradas do eletrodo para lavagem, secagem e pesagem (indicadas na Fig. 1 por linhas tracejadas perpendiculares) não produzem descontinuidades detectáveis na representação i_{pa} vs n° de ciclos. Isto indica que a evolução da corrosão durante o envelhecimento por ciclagem não é afetada pelo processo de retirada, lavagem e secagem do eletrodo de trabalho para sua pesagem, em qualquer das etapas discutidas em relação aos experimentos.

Na Fig. 2 se observam resultados equivalentes aos da Fig. 1, mas agora para os picos de densidade de corrente catódicos. Neste caso também a i_{pc} versus o número de ciclos passa inicialmente por um máximo para logo tender a um estado estacionário que foi interrompido pelo corte accidental de força elétrica, já previamente discutido. Este corte novamente gera um aumento brusco nas primeiras medidas de i_{pc} após o reinício da ciclagem (destacado na figura por uma linha tracejada quase perpendicular) que novamente tendem a um valor estacionário para maior número de ciclos, como ocorria no pico anódico. Também nos ciclos finais das experiências (como no caso anódico) há uma certa tendência ao aumento do i_{pc} nas medidas finais.

Novamente, como no caso da i_{pa} , no caso da i_{pc} na Fig. 2 não parecem aparecer descontinuidades na curva pelas retiradas do eletrodo de trabalho para pesagem, confirmando que este processo não pareceria afetar o processo de envelhecimento da corrosão.

Algo que resulta ainda mais interessante do ponto de vista da corrosão é que ao comparar-se as Figuras 1 e 2 se detecta que na região dos picos os valores de i_{pa} são sempre maiores que os de i_{pc} . Isto estaria indicando que durante estes estados transientes iniciais as quantidades de filmes formados são maiores que as dos filmes reduzidos. Como os possíveis filmes não apresentam solubilidades significativas, estas diferenças na solução estudada só podem ser explicadas devido ao fato de que os filmes estudados apresentariam o fenômeno da dirupção [8].

Por outro lado, no caso das medidas no estado estacionário de i_{pa} e i_{pc} estas adquirem praticamente o mesmo valor de 2 mAcm^{-2} . Isto significaria que após os ciclos iniciais (da ordem de 45.000 a 50.000 ciclos), após os picos das Figs. 1 e 2, o processo voltamétrico se estabilizaria e os filmes formados debaixo do filme dirupto seriam recuperados totalmente. Isto significaria que a corrosão produzida pela ciclagem teria deixado de avançar. Será que estes dados são confirmados pelas medidas de variação da massa? Como veremos a resposta é não e implica que mesmo que as i_{pa} e i_{pc} se voltem praticamente as mesmas, as cargas envolvidas nos picos não o são. Ao parecer, as cargas anódicas continuam a ser maiores que as catódicas e, portanto, a corrosão continua a aprofundar-se. Ocorre que as cargas particularmente anódicas são de difícil determinação, pois se encontram parcialmente sobrepostas à reação de evolução de oxigênio.

Para comprovar algumas destas últimas afirmações, na Fig. 3, podem observar-se os resultados da evolução da massa do eletrodo versus o número de ciclos. Antes de tudo, deve destacar-se que a massa sempre aumenta, embora no início passe por um máximo. Na figura, tem-se assinaladas as distintas colorações que o eletrodo foi adquirindo na ciclagem.

Um aspecto interessante de notar é que, apesar do máximo inicial, o aumento contínuo da parte final da representação da Fig. 3, quando extrapolado para a zona inicial

(ver na Fig. 3 a curva tracejada para baixo número de ciclos), a curva passa justamente pelo valor inicial da massa. Isto de alguma forma significa que o material que deu como consequência o pico inicial logo se transformou no material que na etapa final do experimento recobre o eletrodo parcial ou totalmente. Por outro lado, considerando as colorações apontadas na Fig. 3, estas não têm a ver com a massa do material formado, no entanto, o pico na Fig. 3 deve ser relacionado com os picos das Figs. 1 e 2.

O pico da Fig. 3 pode ser interpretado no sentido de que o filme aumenta em peso pela formação de produtos de corrosão muito mais inicialmente que após um certo número de ciclos já que os produtos de corrosão não são praticamente solúveis. Ao mesmo tempo as duas diferentes inclinações de aumento (inicial e após o pico) estão assinalando que os produtos de corrosão têm nestas duas regiões da ciclagem distinta composição.

Uma forma de compatibilizar estes resultados seria considerar que as colorações observadas estão relacionadas com a superfície do filme sob o corpo de prova, mas que as massas, mostrando o tipo de material que constitui o filme, detectariam o nível de corrosão compatível com a composição do filme. A coloração cinza indicaria possivelmente a presença de sulfatos básicos e/ou PbO . Estes compostos seriam muito mais passivantes (todos ou algum deles) que o filme preto que indicaria possivelmente a predominância do PbO_2 na superfície do filme. Estas interpretações das cores estariam em acordo com o fato de que o corte inesperado na força elétrica nas experiências não teve consequências nos resultados do aumento de massa (ver Fig. 3 onde o corte foi assinalado com uma flecha).

Em consequência, se poderia propor que o aumento inicial para produzir o pico inicial da Fig. 3 estaria relacionado a uma grande presença de PbO_2 no filme, gerando assim os picos observados nas Figs. 1 e 2. O fato da transformação parcial do filme com o aumento do conteúdo de sulfatos básicos ou de PbO no interior do filme seria a causa da redução da corrosão dando lugar a um filme misto que apresentaria uma corrosividade menor. Só ao final dos experimentos pareceria que o filme novamente não consegue inibir a corrosão. Isto estaria indicado pelo novo aumento de peso (ver Fig. 3 comparando a curva tracejada e a contínua ao final dos experimentos). Na atualidade medidas físicas sobre materiais obtidos dos filmes se encontram em realização para comprovar ou refutar estas interpretações.

Conclusões

Sobre a base da realização de voltametrias cíclicas na região de potenciais de funcionamento de placas positivas de baterias de Chumbo-Ácido, medindo-se correntes de pico anódicas e catódicas e o aumento da massa do eletrodo usado como amostra por formação de produtos insolúveis de corrosão, se propõe uma metodologia para estudar comparativamente a resistência à corrosão de ligas de chumbo que se utilizam na fabricação de grades para placas positivas de baterias de Chumbo-Ácido.

Demonstra-se que no estado atual dos conhecimentos a medição das densidades de corrente dos picos anódicos e catódicos que aparecem não é um critério para utilizar no seguimento da evolução da corrosão. Pelo contrário, o seguimento do aumento de peso dos eletrodos usados como corpos de prova parece dar informações relevantes sobre o andamento dos processos corrosivos. Nesse sentido se propõem interpretações aos resultados obtidos, mostrando-se a necessidade de aprofundamento dos estudos para que a técnica proposta, que parecera ser viável, se volte uma técnica realmente disponível.

Referências bibliográficas

- [1] MIRAGLIO, R.; ALBERT, L.; GHACHCHAM, A. EL; STEINMETZ, J.; HILGER, J. P. Passivation and corrosion phenomena on lead-calcium-tin alloys of lead/acid battery positive electrodes. **Journal of Power Sources**, Amsterdã, v. 53, p. 53-61, 1995.
- [2] PEAT, R.; MOSELEY, P. T.; HOLLEMKAMP, A. F.; RAND, D. A. J. A photocurrent imaging study of the distribution of lead monoxide in corrosion layers on lead/acid battery grids. **Journal of Power Sources**, Amsterdã, v. 42, p.119-135, 1993.
- [3] GIESS, H. K. The effect of tin on the charge acceptance of the positive (PbO_2) Lead Acid Battery electrode. In: Proceedings of the Symposium on Advances in Lead-Acid Batteries. Pennington (Nova Jersey), The Electrochemical Society, Inc., v. 84-14, p. 241-251, 1984.
- [4] PAVLOV, D; POULIEFF, C. N.; KLAJA; E.; IORDANOV, N. Dependence of the Composition of the Anodic Layer on the Oxidation Potential of Lead in Sulfuric Acid. **Journal of the Electrochemical Society**, Pennington, Nova Jersey, v. 116, p. 316-319, 1969.
- [5] PAVLOV, D; IORDANOV, N. Growth Processes of the Anodic Crystalline Layer on Potentiostatic Oxidation of Lead in Sulfuric Acid. **Journal of the Electrochemical Society**, Pennington, Nova Jersey, v. 117, p. 1103-1109, 1970.
- [6] FURUKAWA, J.; NEHYO, Y; SHIGA, S. Development of new positive-grid alloy and its application to long-life batteries for automotive industry. **Journal of Power Sources**, Amsterdã, v. 133, p. 25-31, 2004.
- [7] PRENGAMAN, R. D. J. Lead-acid technology: a look to possible future achievements. **Journal of Power Sources**, Amsterdã, v. 78, p.123-129, 1999.
- [8] D'ALKAINE, C. V.; GARCIA, C. M.; BRITO, G. A. O.; PRATTA, P. M. P.; FERNANDES, F. P. Disruption processes in Films grown and reduced electrochemically on metals, **Journal of Solid State Electrochemistry**, Nova Iorque, v. 11, p. 1575-1583, 2007.

Agradecimentos

Os autores (G. A. O. Brito e C. V. D'Alkaine) agradecem à RONDOPAR ENERGIA ACUMULADA LTDA pelo financiamento deste trabalho.

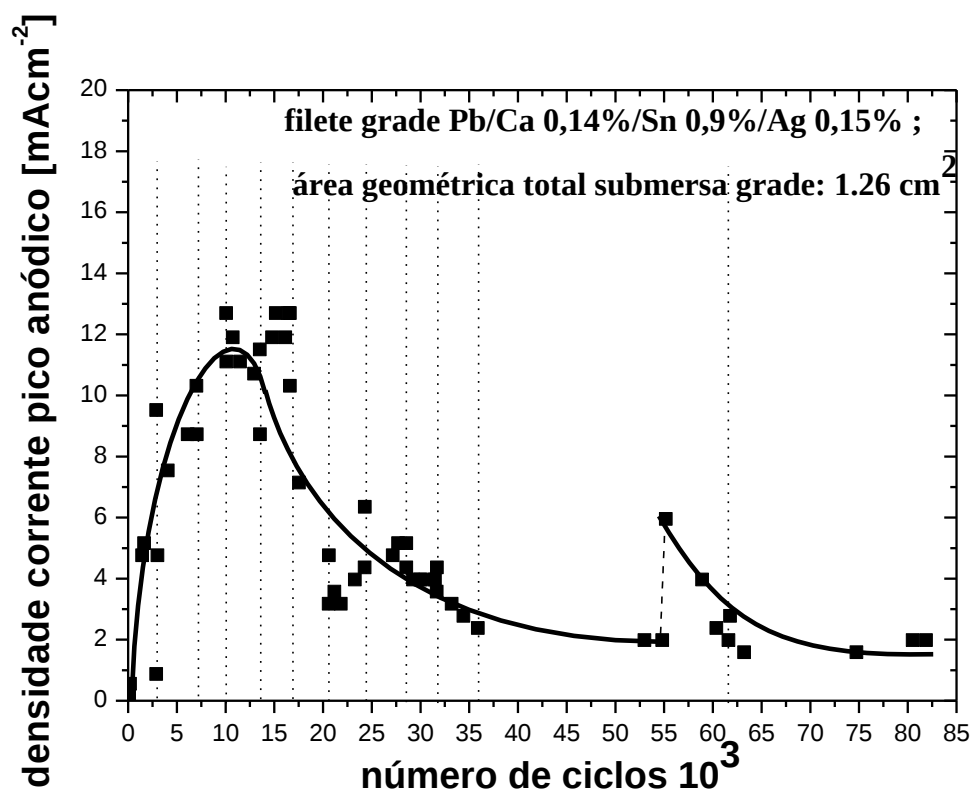
FIGURA 1

Figura 1. Densidade de corrente do pico anódico versus número de ciclos voltamétricos com $E_{+\lambda}$ de +1,3 Volts e $E_{-\lambda}$ de +0,7 Volts. ER: Hg/HgSO₄/H₂SO₄ 4,6M, solução H₂SO₄ 4,6M. Linhas tracejadas indicam ciclos onde o eletrodo de trabalho foi retirado, lavado, secado e pesado. Descontinuidade em 55.000 ciclos ocorreu por corte inesperado da força elétrica.

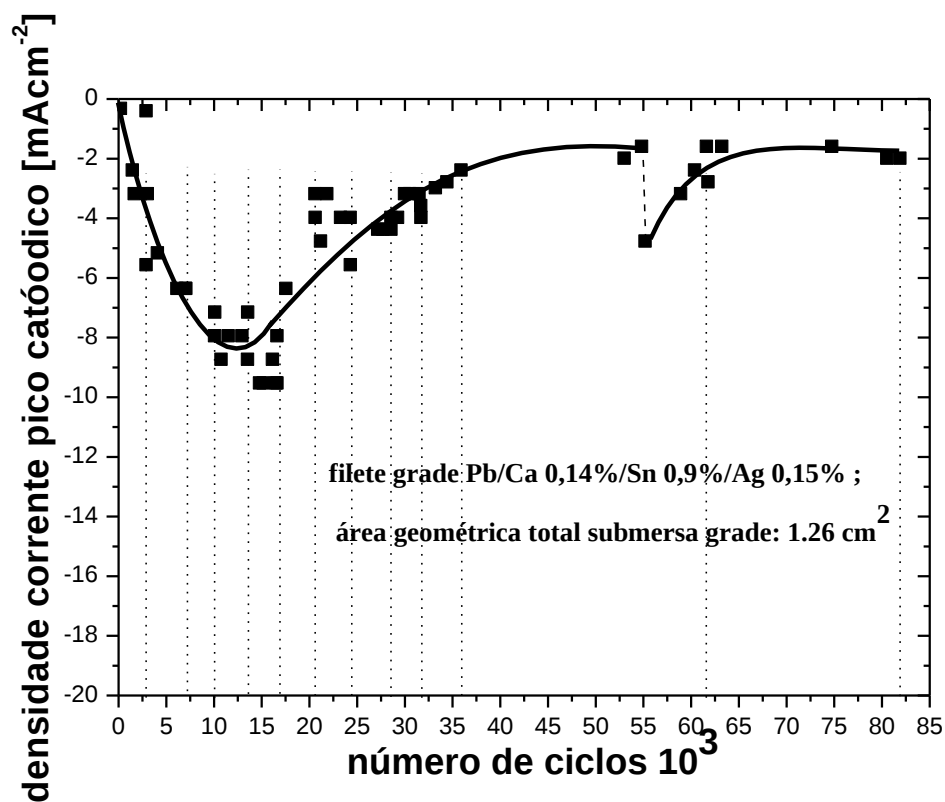
FIGURA 2

Figura 2. Densidade de corrente do pico catódico versus número de ciclos voltamétricos com $E_{+\lambda}$ de +1,3 Volts e $E_{-\lambda}$ de +0,7 Volts. ER: Hg/HgSO₄/H₂SO₄ 4,6M, solução H₂SO₄ 4,6M. Linhas tracejadas indicam ciclos onde o eletrodo de trabalho foi retirado, lavado, secado e pesado. Descontinuidade em 55.000 ciclos ocorreu por corte inesperado da força elétrica.

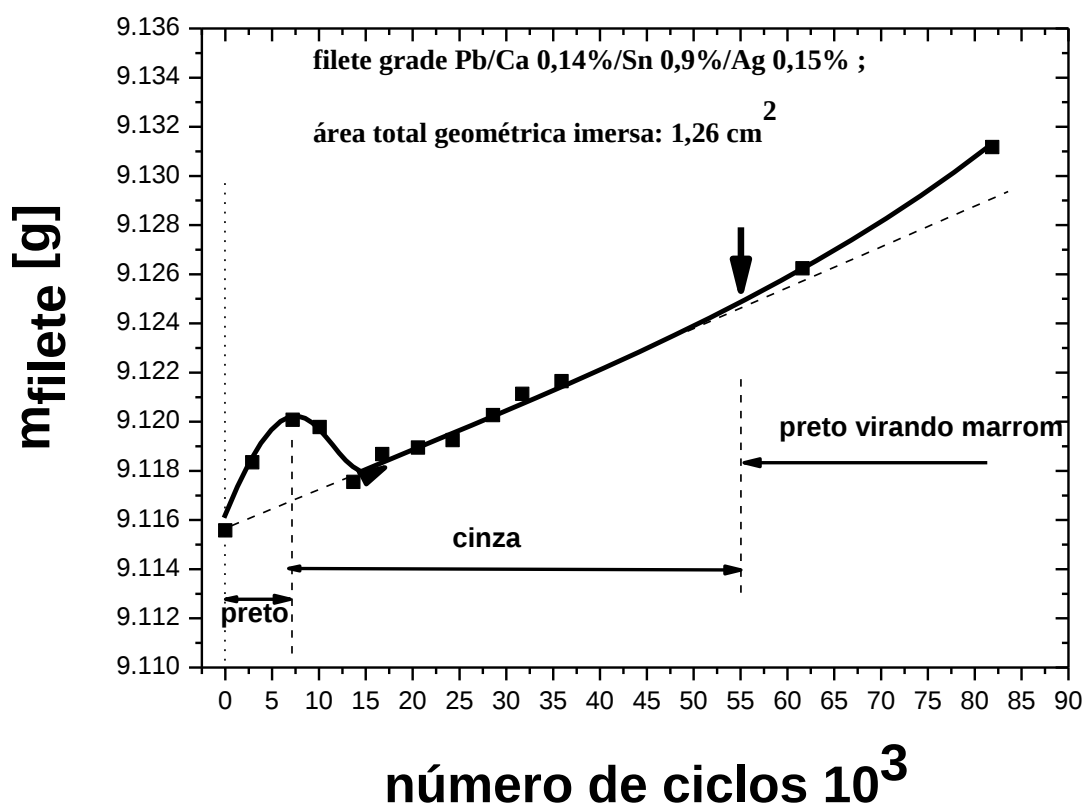
FIGURA 3

Figura 3. Massa do eletrodo de trabalho (barra filete, m_{filete}) versus número de ciclos voltamétricos com $E_{+\lambda}$ de +1,3 Volts e $E_{-\lambda}$ de +0,7 Volts. ER: Hg/HgSO₄/H₂SO₄ 4,6M, solução H₂SO₄ 4,6M. Flecha em 55.000 ciclos indica corte inesperado da força elétrica.