

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA-EE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA-PPMEC

**ESTUDO COMPARATIVO EM CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE
COBRE E ALUMÍNIO EM UM AMBIENTE CORROSIVO.**

JULIO CESAR DUTRA ROSCA

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do
título de mestre em Engenharia
Mecânica

PROF.DR.JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS

Orientador

RIO GRANDE, RS.

2018

Dissertação defendida por Júlio Cesar Dutra Rosca e aprovada em pela
Comissão Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros

Universidade Federal do Rio Grande-Escola de Engenharia

Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl

Universidade Federal do Rio Grande-Escola de Engenharia

Prof. Dr.

Universidade Federal do Rio Grande-Escola de Engenharia

RIO GRANDE, RS.

2018



Ata nº 12/2018 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dez dias do mês de maio de dois mil e dezoito, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas e trinta minutos no Mini auditório do prédio da Fabricação Mecânica no Campus Caminhos desta Universidade, a que se submeteu o mestrando **Júlio Cesar Dutra Rosca**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPMec, com o seguinte título: **ESTUDO COMPARATIVO EM CABOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE COBRE E ALUMÍNIO EM UM AMBIENTE CORROSIVO**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores Fábio Augusto Dornelles do Amaral, Vinícius Martins e Luciano Volcanoglo Biehl, sob a presidência do Professor Jorge Luis Braz Medeiros. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Fábio Augusto Dornelles do Amaral: APROVADO
2. Vinícius Martins: APROVADO
3. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
4. Jorge Luis Braz Medeiros: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. Fábio A. Dornelles do Amaral
CPF: 905.700.220-53
2. Vinícius Martins
CPF: 971.591.310-53
3. Luciano Volcanoglo Biehl
CPF: 975.150.100-00
4. Jorge Luis Braz Medeiros
CPF: 588.871.210-87

Júlio Cesar Dutra Rosca: J. Rosca

DEDICATÓRIA

A minha mãe Ilma (in memoriam).

Ao meu pai Peri (in memoriam).

A minha esposa Patrícia.

**E a todos que de alguma forma
apoiam na minha formação.**

AGRADECIMENTO

Primeiramente quero agradecer a Deus por ser meu guia e me dar força para superar todos os desafios.

A minha mãe e meu pai (in memoriam), sabendo que eles estão participando deste momento da minha vida, me dando a força necessária para vencer.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros pela confiança depositada em meu trabalho. Por momentos de incentivo e encorajamento diante as dificuldades encontradas. Obrigada pelas conversas, infinita paciência, pela orientação exemplar, solidariedade, compreensão e amizade em todos os momentos.

A minha esposa, amiga e parceira Patrícia Rosca, pela paciência, sacrifício, companheirismo e todo o amor que me dedica. Sem você ao meu lado eu não teria conseguido esta vitória. A toda à minha família, em especial as minhas duas filhas Francine e Mauren Rosca, por elas que aceitei tal desafio.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl por ter me recebido no curso de Mestrado, onde eu estava já formado na graduação há aproximadamente 15 anos e ele sempre me incentivou e encorajou diante das dificuldades de readaptação ao convívio universitário, sempre preocupado com a conciliação das aulas com meus horários de trabalho.

A minha empresa onde trabalho, CEEE-D (Companhia Estadual de Energia Elétrica de Distribuição) em Rio Grande/RS, sem essa ajuda, não seria possível termos os cabos para as análises do estudo de corrosão necessárias.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que eu conseguisse concluir este trabalho.

“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade”.
Marie Curie

“Cada dia pode não ser bom, mas há algo de bom em cada dia”.

Autor Desconhecido

RESUMO

A extensão da costa brasileira aumenta a degradação dos materiais pelas condições de temperatura média e umidade relativa bem mais elevada do que nas outras regiões, principalmente, se forem consideradas as áreas litorâneas do Brasil. Rio Grande é uma cidade de clima Subtropical, com forte influência oceânica e com invernos relativamente frios, verões tépidos e precipitações abundantes durante o ano, uma temperatura média anual de 18° C e com umidade relativa média anual da ordem de 81%. Estas condições climáticas juntamente com a poluição industrial são extremamente prejudiciais aos materiais de engenharia, propiciando à corrosão ou degradação dos materiais metálicos.

Temos, como exemplo, nesse trabalho em estudo os metais das linhas de distribuição e transmissão de energia elétrica, o cobre e o alumínio com suas ligas. Dentro dos ensaios apresentados no trabalho, podemos destacar o ensaio de corrosão utilizado a Polarização Potência Dinâmica, onde foi realizada uma comparação com o alumínio, cabo novo e com uso de 7 anos e o cobre, cabo novo e com uso de 5 anos.

A apresentação do trabalho está estruturada em sete capítulos. No primeiro é feito uma introdução, enquanto que no segundo um breve apanhado bibliográfico. No terceiro capítulo são descritas as condições experimentais, desde as composições estudadas até aos parâmetros de diversos ensaios. No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Finalmente apresentam-se algumas conclusões e sugestões para trabalhos a realizar.

Palavras-chave: corrosão atmosférica; degradação de metais; polarização potência dinâmico; microdureza Vickers.

ABSTRACT

The extension of the Brazilian coast increases the degradation of the materials by the conditions of average temperature and relative humidity much higher than in the other regions, especially considering the coastal areas of Brazil. Rio Grande is a city with subtropical climate, with strong oceanic influence and relatively cold winters, warm summers and abundant precipitations during the year, an average annual temperature of 18 ° C and average annual relative humidity of around 81%. These climatic conditions together with industrial pollution are extremely harmful to engineering materials, leading to corrosion or degradation of metallic materials.

We have, for example, in this study the metals of the distribution and transmission lines of electric energy, copper and aluminum with their alloys. Within the tests presented in the work, we can highlight the corrosion test used Dynamic Power Polarization, where a comparison was made with aluminum, new cable and with use of 7 years and copper, new cable and with use of 5 years.

The presentation of the work is structured in seven chapters. In the first an introduction is made, while in the second a brief bibliography is taken. In the third chapter the experimental conditions are described, from the compositions studied to the parameters of several tests. In the fourth chapter the results are presented and discussed. Finally some conclusions and suggestions for work are presented.

Keywords: atmospheric corrosion; degradation of metals; dynamic potentiation polarization; Vickers microhardness.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
1.1OBJETIVOS	14
1.1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.2 JUSTIFICATIVAS	14
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1-Corrosão em Subestações.	15
2.2-Corrosão em Linhas de Transmissão	17
2.3-Corrosão em Linhas de Transmissão em Região Litorânea.....	20
2.4-Corrosão em Cabos de Alumínio com Alma- CAA	23
2.5-Corrosão em Cabos de Alumínio Ligados-CAL.....	26
2.6-Corrosão em Cabos de Cobre	30
2.7-Técnicas de Polarização	32
3. METODOLOGIA	35
3.1 Análise Química.....	36
3.2 Microdureza.	37
3.3 Análise Microestrutura	38
3.4 Polarização	39
3.5 Imersão.....	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 Análise Química.....	41
4.2 Microdureza.	42
4.3 Análise Microestrutura	46
4.4 Polarização.	47

4.5 Imersão	64
5. CONCLUSÕES.....	65
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1. INTRODUÇÃO

- ✓ Tendo em vista a importância de preservar e aumentar a vida útil dos equipamentos e peças metálicas, o estudo dos processos corrosivos e a busca por métodos mais eficientes e adequados de proteção e controle ganham a cada dia mais destaque e importância.
- ✓ A corrosão metálica é um processo espontâneo que acarreta a deterioração de peças metálicas levando a vultosos gastos que envolvem desde a manutenção, até a proteção e a troca de peças; a contaminação de produtos, paralisações e risco de acidentes com perda de vida humana (**GENTIL/1996**).
- ✓ O avanço tecnológico ocorrido no último século veio acompanhado de uma maior utilização de peças e estruturas metálicas em todos os setores de nossa sociedade. Este fato torna o estudo da corrosão, particularmente no que diz respeito ao seu controle, fundamental para preservar a vida útil destes materiais, além de minimizar gastos oriundos dos processos corrosivos. Segundo estudo realizado nos Estados Unidos entre 1999 e 2001, estimou-se em US\$ 276 bilhões (3,1% PIB americano) o custo total da corrosão por ano, sendo que deste valor, US\$ 69 a 82 bilhões (1% PIB) poderiam ser economizados se todas as medidas viáveis de prevenção e controle de corrosão fossem postas em prática (**NACE/2002**).
- ✓ No Brasil, a estimativa de gastos relativos aos processos corrosivos está na faixa de US\$ 15 bilhões ao ano, podendo-se economizar cerca de US\$ 5 bilhões mediante o uso de métodos de prevenção e controle (**WEST/1965**).
- ✓ A importância da atmosfera, como meio corrosivo, pode ser confirmada pelo grande número de publicações científicas relacionadas com ensaios de corrosão utilizando diferentes materiais metálicos e prolongados períodos de exposição, nos mais diferentes países (**GENTIL/2003**).
- ✓ Esta atmosfera, por sua vez, também se tornou mais poluída e, conseqüentemente, mais agressiva aos materiais nela expostos, dada a quantidade incessante de gases, produtos e vapores químicos lançados diariamente à atmosfera, solo, meios fluviais e marítimos (**VIANA /1980**).

1.1 -OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Neste Trabalho faremos um estudo comparativo entre Cabos condutores de energia elétrica, com diferentes tipos de materiais o CAA-Conductor de Alumínio com Alma de aço e o CC-Conductor de Cobre. Estas amostras de materiais foram retiradas da rede de energia elétrica de um ambiente agressivo à corrosão litorânea e industrial.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Serão analisadas nos experimentos algumas Propriedades Mecânicas tanto de materiais novos, como em uso na rede.
- ✓ Também será analisada a Resistência à Corrosão desses diversos tipos de materiais novos e retirados da rede de energia elétrica.

1.2- JUSTIFICATIVAS

- ✓ Este trabalho tem como justificativa o equilíbrio na Relação Custo-Benefício para as concessionárias de Energia Elétrica na escolha correta do material do cabo de Linha de Transmissão, mantendo suas características necessárias num ambiente agressivo à corrosão.
- ✓ Outra justificativa importante seria de evitar a interrupção do fornecimento de energia elétrica, tanto nas Manutenções Corretivas como nas Manutenções Preventivas, por isso a escolha do condutor que tenha tanto a resistência mecânica e também a resistência à corrosão. Essa é uma preocupação que ocorre nas concessionárias de Energia no país, onde são penalizadas pelo Órgão Regulador de Energia a ANEEL, pelas constantes interrupções no fornecimento de energia.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1-Corrosão em Subestações.

Este estudo investigou os principais agentes de corrosão em quatro subestações de energia elétrica do estado do Rio Grande do Sul, três no litoral e uma em Porto Alegre. O objetivo foi determinar as taxas de corrosão de vários materiais metálicos expostos aos agentes agressivos existentes no ambiente das subestações. Foram desenvolvidos experimentos de perda de massa dos materiais expostos em tempo real nas subestações, monitoramento de potencial do solo, determinação da composição química e resistividade do solo, e análise micrográfica e química dos materiais após exposição no sítio de trabalho. **(RIEDER *et al.*, 2009).**

Os sistemas elétricos de potência têm inúmeras conexões mecânicas responsáveis pela ligação entre condutores, barramentos, isoladores, chaves seccionadoras, entre outros equipamentos e componentes, sendo que as subestações de energia são os locais com a maior concentração destas conexões. As ligações realizadas pelos conectores devem permitir a passagem da corrente elétrica sem risco de interrupções do fornecimento de energia. No entanto, nos circuitos de um sistema de potência as conexões geralmente são o elo fraco, pois são levantadas dúvidas quanto à eficiência dos conectores em longo prazo. Devido ao grande número de fatores que podem vir a influenciar a confiabilidade de um conector de potência em serviço é impossível determinar com precisão a sua taxa de degradação, o que dificulta a programação de manutenções preventivas. **(SOUZA *et al.*, 2012).**

Os ensaios de perda de massa foram realizados seguindo as normas ISO (International Organization of Standardization) 8407, 8565 e 9223 a 9227. A resistividade do solo foi determinada pelo método Wenner e as micrografias e constituição química dos produtos de corrosão por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva, respectivamente. **(RIEDER *et al.*, 2009).**

A tomada de decisão num sistema elétrico de quando interferir para a realização de uma manutenção preventiva ou corretiva é crucial para quem trabalha em manutenção, isto é, mediar às consequências entre a interrupção do fornecimento de energia para o consumidor e a preservação da infraestrutura. **(SOUZA *et al.*, 2012).**

Resultados mostraram significativa alteração nas massas do aço e do cobre, principalmente nas subestações litorâneas. Embora os agentes corrosivos existam no solo, as altas taxas de corrosão no litoral estão fortemente associadas à maresia. Já para o zinco e o aço galvanizado, a corrosão foi mais expressiva em Porto Alegre, região urbana sem presença de maresia. Os solos de todas as subestações estudadas apresentaram alta resistividade, o que implica em baixa agressividade destes aos materiais metálicos. Com estas conclusões, fica evidente que os procedimentos e precauções em relação à corrosão dos componentes metálicos das subestações expostas a condições extremas de agressividade, como em presença de íons cloreto e particulados sólidos, não podem ser os mesmos que os adotados para os ambientes livres destes componentes. **(RIEDER *et al.*, 2009).**

A manutenção preditiva baseada somente em amostragens temporais nem sempre é suficiente para garantir a qualidade do sistema. Normalmente as empresas tem um único procedimento para todas as suas subestações o que não é adequado, pois cada região tem características típicas que influenciam mais ou menos na degradação das conexões (neve, maresia, poluição, umidade, entre outras). **(SOUZA *et al.*, 2012).**

Industrialmente, o acionamento elétrico de processos e equipamentos é utilizado em larga escala, tendo em vista fatores econômicos, tais como, balanço energético, custo e rendimento e fatores técnicos, tais como, partida imediata e simplicidade de operação. Por exemplo, as conexões e contatos de equipamentos e barramentos são de grande importância dentro de uma subestação, pois caso haja uma falha nessas interligações pode ocorrer uma interrupção grave no sistema de transmissão de energia elétrica. Estas interligações elétricas estão permanentemente expostas a diversas influências que podem levar a um mau desempenho das mesmas. As principais influências são: ambientais elétricas e mecânicas **(BRAUNOVIC/1994).**

2.2-Corrosão em Linhas de Transmissão

O papel principal da monitorização da corrosão consiste em controlar a eficiência das barreiras de proteção dos cabos utilizadas e a consequente rotura, assim como na detecção de processos de corrosão ativos ou de danos já existentes. O aço pré-esforçado sofre da denominada corrosão sobtensão, onde a deterioração do material se deve à ação conjunta de tensões mecânicas e de um meio corrosivo. A corrosão sobtensão é um tipo de corrosão localizada, na qual as micro fraturas evoluem rapidamente para fendas, devido ao esforço de tração a que estão submetidos os cordões do cabo. Existem, atualmente, no mercado alguns métodos que permitem avaliar o nível de corrosão dos cabos de pré-esforço, tais como inspeção invasiva, monitorização magnética e acústica, ensaios de vibração e métodos eletroquímicos. A avaliação da corrosão nos cordões consiste na medição da resistência elétrica dos mesmos, controlando assim a sua evolução ao longo do tempo. Esta técnica tem por base a alteração da resistência elétrica de um metal em função da redução da sua secção transversal, devida à corrosão, traduzindo-se num incremento da resistência. Pode observar-se a relação entre os diferentes parâmetros influentes. $R = \rho_{metal}(T) \cdot \frac{L}{A} = \frac{V}{I}$ em que R é a resistência elétrica em $[\Omega]$, $\rho_{metal}(T)$ é a resistividade do metal, em $[\Omega m]$, à temperatura T em $^{\circ}C$, L é o comprimento do elemento em [m], A é a área transversal do elemento em $[m^2]$, V é a diferença de potencial elétrico em [V] e I é a intensidade de corrente elétrica em [A]. Para uma corrosão localizada, a medição da resistência elétrica deve realizar-se diretamente no cordão, com o objetivo de se ter uma maior sensibilidade nos resultados. Além disso, o equipamento deve ser de alta precisão, por exemplo, um micro-ohmímetro, visto que os processos de corrosão localizada não implicam grande quantidade de perda de massa, logo resultam variações de resistência muito baixas. A ligação entre o elemento sensor e o equipamento tem uma configuração de 4 fios, por ser mais adequada para ler pequenas resistências, pelo facto de eliminar as resistências introduzidas pelos fios elétricos, utilizados para as ligações, e as das próprias ligações. É importante analisar os parâmetros que influenciam a resistência elétrica, como a aplicação de filtros que minimizem o ruído elétrico e a compensação dos efeitos da temperatura; (MAIA *et al.*, 2012).

A importância dos problemas de corrosão é observada segundo dois aspectos principais. O primeiro deles é o econômico tendo em vista que seu custo assume cifras astronômicas. No Brasil, segundo aplicação do índice de Hoar os custos relacionados à corrosão corresponderiam a aproximadamente 40 bilhões de reais em 2005(Wolynec, 2003). O segundo está relacionado ao custo de monitoramento do controle de corrosão, que na maioria das concessionárias de energia atualmente é realizado da seguinte forma: São realizados ensaios em campo do potencial de corrosão utilizando multímetro calibrado, que geram um custo anual de aproximadamente R\$188.985,00 para monitoramento de 5 linhas de transmissão contendo total de 3351 torres, sendo feita amostragem em 10 torres de cada linha, totalizando 50 torres analisadas por ano, dados obtidos pela Eletronorte, 2012. Medição em campo da resistividade do solo, do potencial de eletrodo, o ruído eletroquímico e resistividade de polarização linear, com a utilização do analisador de corrosão (*Field Machine compact*) e de um *notebook*, vide Figura 1. (SILVA *et al.*, 2012)

Figura 1– Equipamento Field Machine Compact + notebook em um ensaio em campo



Fonte: SILVA *et al.*, 2012

Este trabalho apresenta um protótipo do equipamento utilizado para detectar falhas em cabos condutores empregados nas linhas de transmissão de energia elétrica. O equipamento é capaz de executar inspeção visual das condições externas dos condutores e descobrir falhas internas em seu núcleo de material magnético (cabos ACSR). O equipamento é composto por uma unidade móvel - um robô - que se move sobre o condutor da linha (Figura 2), e por uma unidade de controle - um notebook – que se comunicam via rádio. O projeto do equipamento leva em consideração as interferências eletromagnéticas (EMI) e de radiofrequência (RFI), o que permite a sua utilização em linhas vivas, em linhas não energizadas e em cabos para-raios. Para verificar o desempenho do equipamento em diferentes situações, vários testes foram executados: em laboratório, tanto em condições sem energia bem como em condições com energia e em uma linha de transmissão real energizada. Também é apresentada a caracterização da atmosfera em três subestações de energia elétrica da CHESF. Ela foi feita em conformidade à norma NBR 14643, com a instalação de corpos-de-prova padrão e determinação das suas perdas de massa, além de dispositivos de captação de poluentes. (SEBRAO *et al.*, 2009)

Figura 2 - Foto do robô durante seu movimento sobre o condutor



Fonte: SEBRAO *et al.*, 2009

2.3-Corrosão em Linhas de Transmissão em Região Litorânea.

A extensão do litoral brasileiro faz com que gastos no setor elétrico e nos demais setores da indústria com a degradação de materiais sejam altos, e que, geralmente podiam ser menores com a utilização de tecnologias adequadas. De acordo com o Índice de Brooks, toda a costa brasileira apresenta uma degradação moderada, mas não são consideradas as diferenças climáticas existentes. No nordeste e no sul do país, o clima é dominado por diferentes massas de ar, sendo que o primeiro tem maior influência das massas tropicais e equatoriais enquanto que a outra região é constantemente atingida por frentes polares. **(PORTELLA/2011).**

A extensão da costa brasileira aumenta a degradação dos materiais pelas condições de temperatura média e umidade relativa bem mais elevada do que nas outras regiões, principalmente, se forem consideradas as áreas litorâneas do Norte e Nordeste do Brasil. **(BRAMBILLA/2009).**

Contaminantes corrosivos na atmosfera são originados tanto artificialmente como naturalmente e, tendem a afetar a vida útil das estruturas metálicas e bens de consumo. A corrosão atmosférica manifesta-se em ambientes abrigados e/ou ao ar livre. A tendência inicial da superfície de um metal ser atacado vai depender da presença de umidade, de constituintes corrosivos e da localização geográfica. **(WAVRIK *et al.*, 2009).**

O Estado do Rio Grande do Norte é o maior produtor brasileiro de sal marinho, e possui um índice de poluição salina bastante elevada. Esta condição natural tem se constituído num desafio para a COSERN no sentido de se conseguir manter a operação de suas redes de distribuição instaladas em áreas agressivas dentro de índices aceitáveis de confiabilidade do Sistema. **(MIRANDA *et al.*, 2007).**

A atmosfera litorânea é extremamente agressiva para os materiais de engenharia, ideia que pode ser confirmada pelo grande número de publicações científicas relacionadas aos ensaios de corrosão utilizando diferentes materiais e prolongados períodos de exposição, nos mais diferentes países **(CASTAÑO *et al.*, 2010; KATAYAMA, *et al.*, 2005; LAN *et al.*, 2006; MORALES *et al.*, 2005; NATESAN *et***

al., 2006; NUNEZ *et al.*, 2005; RODRÍGUEZ *et al.*, 2002; VERA *et al.*, 2008; YUANTAI *et al.*, 2010).

Os ambientes são normalmente classificados quanto à sua agressividade em função do tipo e da quantidade de poluentes presentes na atmosfera. Desta forma, as atmosferas podem ser classificadas como: Atmosfera rural – quando o ambiente é isento de poluentes e a degradação dos materiais é função somente de fatores tais como: umidade relativa, temperatura, índice de precipitação pluviométrica e radiação solar. Atmosfera urbana – neste caso a agressividade do ambiente, além dos fatores climáticos, é caracterizada pela presença de poluentes provenientes de indústrias leves e pelos motores de combustão interna. Atmosfera industrial – o ambiente é fortemente influenciado pela presença de poluentes originados da exaustão de complexos industriais de grande porte. Atmosfera marinha – neste ambiente os poluentes de maior importância são os sais transportados pelos ventos no sentido do mar para a terra. Além disso, pode eventualmente haver combinação de dois ou mais tipos de atmosferas como o caso da reunião da atmosfera marítima com a urbana e a industrial. (WAVRIK *et al.*, 2009).

Sendo assim, várias foram as experiências realizadas no litoral do Estado com a instalação de materiais e equipamentos expostos à salinidade, visando avaliar se os produtos e soluções apresentados conseguem produzir o efeito desejado. Este trabalho tem por finalidade apresentar os resultados destas experiências e suas contribuições para a solução dos problemas causados às redes de distribuição por agressividade salina na área de concessão da COSERN. Com cerca de 400 km de extensão, o litoral do Rio Grande do Norte apresenta condições bastante peculiares (ventos, correntes marinhas, condições climáticas) que lhe permitem a condição de maior produtor de sal marinho do Brasil, sendo responsável por 95% da produção nacional. Esta característica tem se tornado um desafio para a COSERN no sentido de conseguir manter suas redes de distribuição localizadas no litoral em condições de operação que permitam uma boa confiabilidade, visto que estão instaladas em um dos ambientes mais críticos para a realização de manutenção e conservação. (MIRANDA *et al.*, 2007).

Nesta pesquisa está apresentado um estudo comparativo entre as duas regiões com características climáticas diferentes, que é o caso do balneário de Pontal do Sul, situado no litoral do Paraná, e a região de costa do Sauipe, localizado na região metropolitana de Salvador, no estado da Bahia. Para tanto, foram instaladas duas estações de corrosão atmosférica (ECA's) e expostos corpos de prova (CP's) dos metais-padrão, comumente utilizados em linhas de transmissão e redes de distribuição de energia elétrica, e de concreto armado, a fim de testar diferentes aditivos, como sílica ativa, metacaulin, borracha de pneu e fibras poliméricas, para avaliar tanto de forma quantitativa como qualitativa a agressividade dos meios frente à corrosão da atmosfera, em um período aproximado de um ano. Durante essa exposição ao intemperismo natural, houve o acompanhamento mensal dos teores de cloreto e sulfato, bem como dos dados meteorológicos, a fim de se obter diferentes subsídios para classificação da corrosividade atmosférica. A ECA de Pontal do Sul foi classificada como atmosfera rural, categoria mais baixa de agressividade (C1), baseando-se no tempo de superfície úmida e na concentração dos poluentes enquanto Sauipe foi descrita como atmosfera marinha (C4), considerada alta. Porém, para as taxas médias de corrosão dos metais, após um ano de exposição, apenas o cobre degradou mais no litoral baiano. O material mais adequado para essa região foi o alumínio, seguido do aço galvanizado. Já, no litoral paranaense, o cobre degradou menos que os demais, em média. Os dois locais apresentaram na maior parte do tempo ventos provenientes do oceano, que são ricos em íons cloreto, e umidade relativa média anual acima de 80%, dois fatores que causam aumentos significativos nas velocidades cinéticas de corrosão. A temperatura média anual na região de Sauipe foi de 25 °C e em Pontal foi de, aproximadamente, 22 °C. A partir de normas técnicas foi analisada a corrosividade estimada (ISO 9223) e a observada (NBR 14643), e apenas o alumínio na Bahia se comportou de acordo com o esperado. No Paraná, todos os metais tiveram corrosividade alta (C4) ou muito alta (C5). Tal fato pode ser relacionado com a limpeza química realizada antes da exposição dos CP's, que remove os produtos de corrosão, responsáveis, geralmente, pela formação de uma camada passivadora na superfície do material. Aços carbono e galvanizado em Sauipe não degradaram tanto quanto indicavam os teores de poluentes e o tempo de superfície úmida. **(PORTELLA/2011).**

2.4-Corrosão em Cabos de Alumínio com Alma- CAA

A sobreposição de metais dissimilares (alumínio e aço zincado), constituintes do cabo CAA, favorece a formação de células galvânicas, aumentando a velocidade de corrosão de um metal em relação a seu par. Outros fatores importantes que colaboram para a progressão do processo de corrosão são as juntas, emendas e dobras que merecem uma atenção especial por propiciar o acúmulo de poluentes, estagnação de água, acúmulo de particulados e formação de pares galvânicos através da justaposição de metais dissimilares, fatores esses que tornam essas regiões mais susceptíveis à corrosão. (AOKI *et al.*, 2004).

CAA é o cabo mais utilizado em linhas de distribuição de energia, com fios centrais de aço zincado e fios externos de alumínio-liga 1350-H19. O processo corrosivo mais preocupante à integridade desse cabo é o que ocorre no seu interior, isto é nos fios de aço zincado. Uma vez danificado, os fios de aço deixam de conferir sustentação e o cabo rompe sem que haja sinais visuais significativos antecipados do processo corrosivo que se encontra no interior do cabo CAA. Portanto, o desenvolvimento de um programa de supervisão das linhas de distribuição para mapear o estado em que se encontram quanto à corrosão é fundamental do ponto de vista econômico e de segurança. (BARBOSA *et al.*, 2006).

A expectativa de vida de um condutor é determinada pelas condições de operação da linha de energia associada às condições do ambiente aos quais que estão expostos. [3] Portanto, conhecer as reais condições do cabo instalado é uma ferramenta de suma importância para avaliar o custo/benefício da manutenção, substituição ou reparo do cabo. Os ambientes mais críticos para os cabos CAA, associado ao regime de operação em termos de corrosão são: ambientes marinhos, industriais ou suas combinações. (AOKI *et al.*, 2004).

Classificações das Áreas Quanto a Corrosão Atmosférica: **a) Área Tipo A (Corrosão Desprezível ou Moderada):** é o tipo de corrosão que se verifica

aproximadamente entre 15 e 25 anos, comprometendo sem riscos o desempenho dos equipamentos e materiais. São ambientes localizados a partir de 20 km de distância da orla marítima; **b) Área Tipo B1 (Corrosão Mediana):** é o tipo de corrosão que se verifica aproximadamente entre 10 e 15 anos, com comprometimento moderado de riscos do desempenho dos equipamentos e materiais. São ambientes localizados a distâncias maiores que 5 km e menores que 20 km da orla marítima, podendo existir alguns anteparos naturais ou artificiais, não estando diretamente expostos a ação corrosiva; **c) Área Tipo B2 (Corrosão Severa):** é o tipo de corrosão que se verifica aproximadamente entre 5 e 10 anos, comprometendo com riscos o desempenho dos equipamentos e materiais. São ambientes localizados a distâncias maiores que 2 km e menores que 5 km da orla marítima, podendo existir alguns anteparos naturais ou artificiais, não estando diretamente expostos a ação corrosiva; **d) Área Tipo C (Corrosão Muito Severa):** é o tipo de corrosão que se verifica no período de até 5 anos, comprometendo severamente o desempenho dos equipamentos e materiais. São ambientes expostos diretamente a ação corrosiva, sem nenhum anteparo natural ou artificial, ficando no máximo até 2 km da praia, de portuários salinos e embocaduras de rios. Na Tabela 1 podemos verificar resumidamente as áreas e os limites de exposição à corrosão.

Tabela 1: Exposição dos Tipos de Áreas a Partir da Orla Marítima

Tipo de Área	Localização em Relação à Orla Marítima
C	Orla Marítima.....2km
B2	>2 km.....5km
B1	>5 km.....20km
A	>20 km

Fonte: SANTOS/2013-COELCE

Condutores de Alumínio Nu com Alma de Aço (CAA) Devem ser usados nas redes de distribuição de média tensão, localizadas em áreas de corrosão desprezível. No interior, instalar a partir de 20 km da orla marítima. (SANTOS/2013-COELCE).

Determinar o estágio da corrosão da camada de zinco sobre o aço é muito importante para o sistema de distribuição e transmissão de energia, pois quando esta é totalmente consumida pelo processo de corrosão, coloca o aço em contato direto com o alumínio formando assim uma outra pilha galvânica mais ativa o que aumenta sobremaneira a velocidade de corrosão, comprometendo as funções mecânicas e elétricas e consequentemente o fornecimento de energia, pois resulta num rompimento inesperado do cabo. (AOKI *et al.*, 2004).

Diante da premissa básica de manter a integridade física do cabo, diversas técnicas foram avaliadas em laboratório, a que se tornou mais viável e eficaz foi à aplicação de um campo magnético. O método de detecção magnético foi desenvolvido no sentido de maximizar o campo de reação produzido pelo aço e pelo zinco e, simultaneamente, minimizar o campo de reação produzido pelo alumínio. (AOKI *et al.*, 2004).

2.5-Corrosão em Cabos de Alumínio Ligados-CAL

A resistência do alumínio não é elevada, contudo a adição de elementos químicos, como o silício e o magnésio, associados à aplicação de tratamento térmico, permite obter um material de grande aplicação nas estruturas resistentes. (SANTOS et al., 2002).

Ligas de alumínio podem ser produzidas através da adição de adequados elementos de liga, tais como Cu, Mg, Zn e por adequados procedimentos de tratamento de calor (ZOR et al., 2010; ANDREATTA et al., 2003; CABOT et al., 1995).

As ligas a base de alumínio-silício são as mais utilizadas comercialmente, principalmente por causa de suas boas características de fundição, resistência mecânica e resistência à corrosão. Estas ligas têm sido amplamente utilizadas como substitutas de algumas ligas ferrosas, pois também apresentam baixo peso específico, sendo importantes para fabricação de peças em diversos setores industriais, sejam eles em indústrias marítimas, automobilísticas, elétricas, alimentícias ou de aviação (KORI, et al., 2000; LI, et al., 2004).

Diante disso, o presente estudo objetiva investigar o papel do silício na resistência à corrosão de ligas Al-Si através do comportamento eletroquímico destas ligas de alumínio com a aplicação das técnicas eletroquímicas de monitoramento do potencial de corrosão, que tem como função fazer com que o eletrodo de trabalho entre em equilíbrio eletroquímico com a solução, polarização potencio dinâmica que acompanha os processos de oxi-redução no material (se houver) deslocando o potencial para o lado anódico ou catódico, cronoamperometria e a espectroscopia de impedância eletroquímica que fornecem o comportamento geral do sistema, quando um número grande de processos intercorrelacionados ocorre em diferentes velocidades. (MARQUES, 2011; CARVALHO, ANDRADE e BUENO, 2006).

As grandes maiorias das linhas de transmissão de energia elétrica são feitas de materiais não homogêneos. Tipicamente, estas são feitas de um material central de alta resistência, envolto por um material de alta condutividade. O tipo mais comum de condutor é o condutor feito com uma alma de aço envolto por cabos de alumínio.

Aluminium Conductor Steel Reinforced (ACSR). Mais recentemente, o condutor homogêneo *All- Aluminium Alloy Conductor* (AAAC), tem se tornado bem popular. Estes condutores são feitos de ligas tratáveis termicamente do sistema Al-Mg-Si (DAVIES, 1988). Estas ligas são conhecidas como 6201 e 6101. **(QUADRO, et al., 2012).**

Vantagens de cabos condutores com liga 6201 / 6101. (AAAC) sobre os ACSR são:- Maior resistência mecânica por peso.

- Possibilidade do uso de estruturas mais leves e torres mais distantes.
- Menor resistência elétrica e melhor taxa de corrente do que o tamanho equivalente de ACSR.
- Maior dureza superficial, e conseqüente, menor probabilidade de danos superficiais durante o manuseio.
- Melhor performance a corrosão.
- Alta resistência à fluência. Além das propriedades acima, os condutores AAAC podem reduzir os custos da perda elétrica. **(DAVIES /1988).**

Os principais elementos de liga do alumínio são: o cobre (Cu), o silício (Si), o magnésio (Mg), o manganês (Mn) e o zinco (Zn). A adição destes metais ao alumínio tem como objetivo aumentar a resistência mecânica, melhorar as características de fundição, aumentar a facilidade de soldadura e em alguns casos melhorar as propriedades anticorrosivas. A escolha dos elementos a adicionar depende das propriedades finais que se pretendem obter [1].

Embora as ligas de alumínio apresentem uma melhor resistência mecânica, são mais sensíveis à corrosão do que o alumínio puro, e o seu comportamento é fortemente influenciado pela composição das atmosferas onde se encontrem (como por exemplo, a grau de humidade e a presença de contaminantes (como: SO₂ e Cl⁻)). Assim torna-se muitas vezes necessário a utilização de métodos de proteção contra a corrosão, como por exemplo, o seu tratamento superficial por aplicação de revestimentos protetores, adição de inibidores de corrosão, entre outros **(FERREIRA, et al.,1997).**

A resistência à corrosão do alumínio e suas ligas está associada à camada de óxido protetora que se forma naturalmente à sua superfície em condições atmosféricas normais, levando à passivação da liga e conseqüentemente à redução da velocidade de corrosão **(EZUBER, et al.,2008)**.

Os tipos de corrosão mais comuns nas ligas de alumínio são: a corrosão por picada, que se dá na presença de íons cloretos; no caso de este estar revestido, a corrosão filiforme, onde ocorre formação de filamentos finos a partir dos defeitos no revestimento progredindo em diferentes direções **(FERREIRA, et al.,1997; EZUBER, et al.,2008; [2])**.

As linhas de transmissão e distribuição têm utilizado largamente o Al 1350 ou Al EC (Electric Conductor) desde o início do século XX. Esta liga apresenta uma boa condutividade, acima de 60% IACS (International Annealed Copper Standard), justificando a sua grande utilização. A sua resistência mecânica, apenas regular, propiciou a necessidade de desenvolvimento de outras ligas mais resistentes, com maior carga na tensão de ruptura. Nesta condição foi desenvolvida a Liga 6201 (Liga de Alumínio-Magnésio-Silício) que, em determinadas situações, pode eliminar os fios de aço como reforço mecânicos dos cabos de alumínio nu com alma de aço, acarretando um custo menor nos projetos de linhas de transmissão e distribuição.

- Composição química

Basicamente este material é uma liga com adição de Magnésio e Silício, proporcionando aproximadamente o dobro da resistência mecânica, comparativamente ao Al 1350 H-19, utilizado em cabos ACSR.

- Resistência à corrosão

Sua principal diferença em relação às outras ligas alternativas é o método de tratamento térmico, de solubilização antes da trefilação, que confere ao material um significativo aumento de resistência à corrosão inter-granular.

Esta característica permite a instalação de condutores em regiões de atmosfera agressiva, de alta poluição e/ou salinidade marítima severa com resultados muito mais eficazes em relação aos cabos ACSR. A camada de zinco dos fios de aço da alma dos cabos ACSR sofre ataque químico nestes ambientes agressivos, expondo o aço e produzindo corrosão também nos fios de Alumínio, reduzindo drasticamente a vida útil do condutor. Existem condutores com liga de Al 6201 instalados em ambientes

agressivos há mais de 30 anos operando normalmente, situação que seguramente não ocorreria com o ACSR.

Vantagens

A flexibilidade na utilização de condutores com a liga de Al 6201, associada ao Al 1350, possibilita projetos de linhas de transmissão ou distribuição com características otimizadas de resistência mecânica e condutividade requeridas ou pré-determinadas. É uma opção bastante interessante que deve ser analisada cuidadosamente para se obter as seguintes vantagens:

- Maior versatilidade no projeto
- Boa resistência à corrosão
- Alta relação ruptura/peso
- Acessórios mais simples
- Alta resistência à fluência
- Reduz as perdas

Todas as vantagens acima mencionadas contribuem para a redução de custos de um projeto. (**Manual do Fabricante NEXANS**)

2.6-Corrosão em Cabos de Cobre

Cabos de transmissão elétrica requerem elevada condutividade elétrica, portanto, baixa resistividade, e alta resistência mecânica a esforços de tração e à corrosão. O cobre e suas ligas constituem um dos maiores grupos de metais comerciais na atualidade. Em razão das suas excelentes condutividades elétrica e térmica e sua boa resistência mecânica, à corrosão e à fadiga, tornam este metal e suas ligas muito usados em diversas aplicações, especialmente àquelas em que a condução elétrica ou térmica ou ambas são fundamentais. **(SAFRA/2011).**

Atualmente, em alguns campos da indústria, há uma grande exigência por metais e ligas metálicas que mantenham, em parte, suas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas quando submetidas a severas condições de trabalho, sejam por esforços mecânicos ou em altas temperaturas. Cobre e suas ligas, portanto, são aplicadas em diversos campos em que essas propriedades são exigidas, ligas de CuCr, CuZr e CuCrZr são algumas dessas ligas, em especial a liga de CuCrZr, uma liga que relaciona excelentes resistências mecânica, à corrosão e à fadiga e excelentes condutividades elétrica e térmica. **(HUAQING et al.,2008; SAARIVIRTA et al.,1960)**

Em muitas aplicações elétricas, em que são geradas grandes quantidades de energia térmica, ligas de CuAg e CuCr são aplicadas, no entanto, as ligas de CuAg possuem vida útil menor comparada a liga de CuCr, por estarem sujeitas a deformações a temperaturas de trabalho que excedem centenas de graus Celsius.**(SAARIVIRTA et al.,1960).**

Várias falhas catastróficas, surgidas recentemente em transformadores de potência jovens, têm sido associadas à presença de sulfureto de cobre, depositado no cobre e no papel dos respectivos enrolamentos. Estas falhas têm consistido em curtos-circuitos violentos, entre espiras, normalmente pertencentes aos enrolamentos de alta tensão. **(MARTINS /2008).**

Principalmente em ambientes com déficit de oxigénio, (tais como os que se encontram em certos transformadores em que não há contato entre o óleo e o ar), aumenta a probabilidade de ataque do cobre dos enrolamentos, pelos compostos de enxofre corrosivos. Tal ataque origina a formação de sulfuretos de cobre, que são visíveis através de manchas de cor negra, cinzenta de grafite ou castanha escura na superfície do cobre. **(MARTINS /2008).**

Adicionalmente, foi constatado que, a espessura da camada de sulfureto de cobre, depositada sobre o condutor de cobre do enrolamento, aumenta à medida que a temperatura do óleo e do cobre aumenta. **(MARTINS /2008).**

2.7-Técnicas de Polarização.

As reações eletroquímicas que podem ocorrer na interface de um corpo-de-prova dependem do potencial de eletrodo a que a superfície está submetida, e o estudo destas reações pode ser feito através da relação entre o potencial aplicado e a corrente gerada nas reações eletroquímicas (anódicas e catódicas) que se desenvolvem. Assim, a varredura contínua de potencial e o correspondente registro da corrente gerada permitem o estudo do comportamento eletroquímico de um material, gerando a curva de polarização deste material (STANSBURY/1985; SEDRIKS/ 1986).

A polarização eletroquímica é um método de fundamental importância no estudo da corrosão. Para realização de ensaios de polarização são utilizados equipamentos eletrônicos especiais como potenciostato/galvanostato, fontes de tensão contínua, voltímetros de precisão entre outros. No potenciostato/galvanostato são controlados o potencial e a leitura da corrente da resposta em corrente do sistema, sendo que a aquisição desses dados é conduzida em um computador acoplado ao potenciostato e uma curva de potencial versus logaritmo da corrente, chamada de curva de polarização é obtida. Essas curvas podem ser de dois tipos: Potenciodinâmica, na qual o potencial varia continuamente e a corrente de resposta é registrada e Potencioestática, na qual o potencial varia descontinuamente, medindo-se a corrente correspondente após sua estabilidade. Da mesma forma, as curvas de correntes controladas são também de dois tipos; Galvanocinética, na qual a corrente varia continuamente com o tempo e registra-se o potencial e Galvanoestática, na qual a corrente varia ponto a ponto e espera-se sua estabilização para registro do potencial. (FONTANA/ 1986).

A polarização Potenciodinâmica é a técnica para a obtenção de curvas de polarização, e prevê a varredura contínua do potencial, iniciando-se ou no potencial de corrosão (aquele que se estabelece quando da imersão do material na solução, também chamado de potencial de circuito aberto) ou em potenciais onde predominam reações catódicas (aqueles menores que o potencial de corrosão), elevando-se o potencial a taxa de varredura constante. A velocidade de varredura, a composição da solução, o tempo de imersão anterior à varredura de potencial e a temperatura de ensaio podem influenciar a forma das curvas de polarização. A corrente, nas curvas de polarização, é

mostrada em valores absolutos, e é dividida pela área de material exposta às reações, criando o conceito de densidade de corrente. (**MAGNABOSCO/2001**).

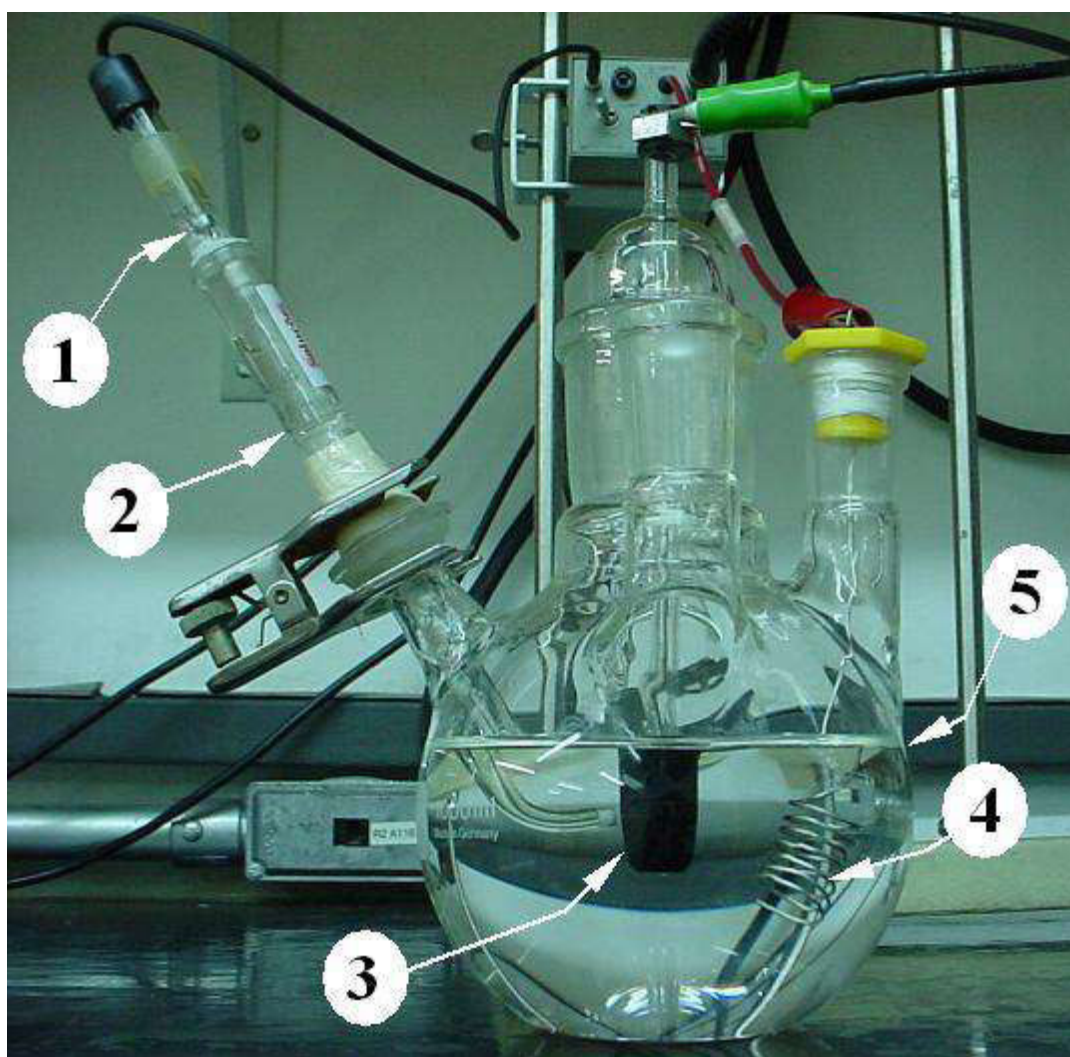
A amostra a ser estudada é mergulhada na solução dentro de uma célula eletroquímica que é um dispositivo usado para criar uma força eletromotora num condutor que separa as reações de oxidação e redução onde se procura reproduzir as condições encontradas em situações reais. Uma montagem clássica de célula é a chamada célula de três eletrodos, que consiste em um eletrodo de trabalho, um eletrodo de referência e um contra-eletrodo. Nessa célula eletroquímica, o metal é o eletrodo de trabalho e o meio corrosivo é o eletrólito. Uma corrente circula entre o eletrodo de trabalho e o contra- eletrodo, formado por um material inerte, tal como a platina. O potencial do eletrodo de trabalho é medido com relação a um eletrodo de referência, por exemplo, o eletrodo de prata-cloreto de prata. A corrente aplicada equivalente à diferença entre a corrente correspondente ao processo de redução e aquela correspondente ao processo de oxidação. Quando os eletrodos da célula eletroquímica são conectados, ocorrem processos de oxidação e redução e os potenciais desses eletrodos não permanecerão constantes nos valores de potenciais de equilíbrio referenciais, mas irão variar com o tempo. Essa diferença entre o potencial de equilíbrio tabelado e o real medido é chamada polarização. Polarização pode ser definida como um afastamento do potencial de eletrodo como resultado de uma corrente global. Uma medida da polarização é a sobrevoltagem, definida como o potencial do eletrodo menos o potencial de equilíbrio de corrosão. (**FONTANA/1986**).

Muitas são as causas da polarização. Além de contatos galvânicos, pode ocorrer: pela presença de meio oxidante, pela diferença de concentração iônica, pela diferença de temperatura, pela diferença de aeração, por uma fonte externa. (**GENTIL/1996**).

Célula eletroquímica tipo balão volumétrico.

1. Eletrodo de referência: calomelano.
2. Capilar de Luggin: extensão para o eletrodo de referência.
3. Eletrodo de trabalho: corpo-de-prova.
4. Contra-eletrodo: fio de platina em forma de espiral ou mola.
5. Nível do eletrólito. (LIBERTO/2004).

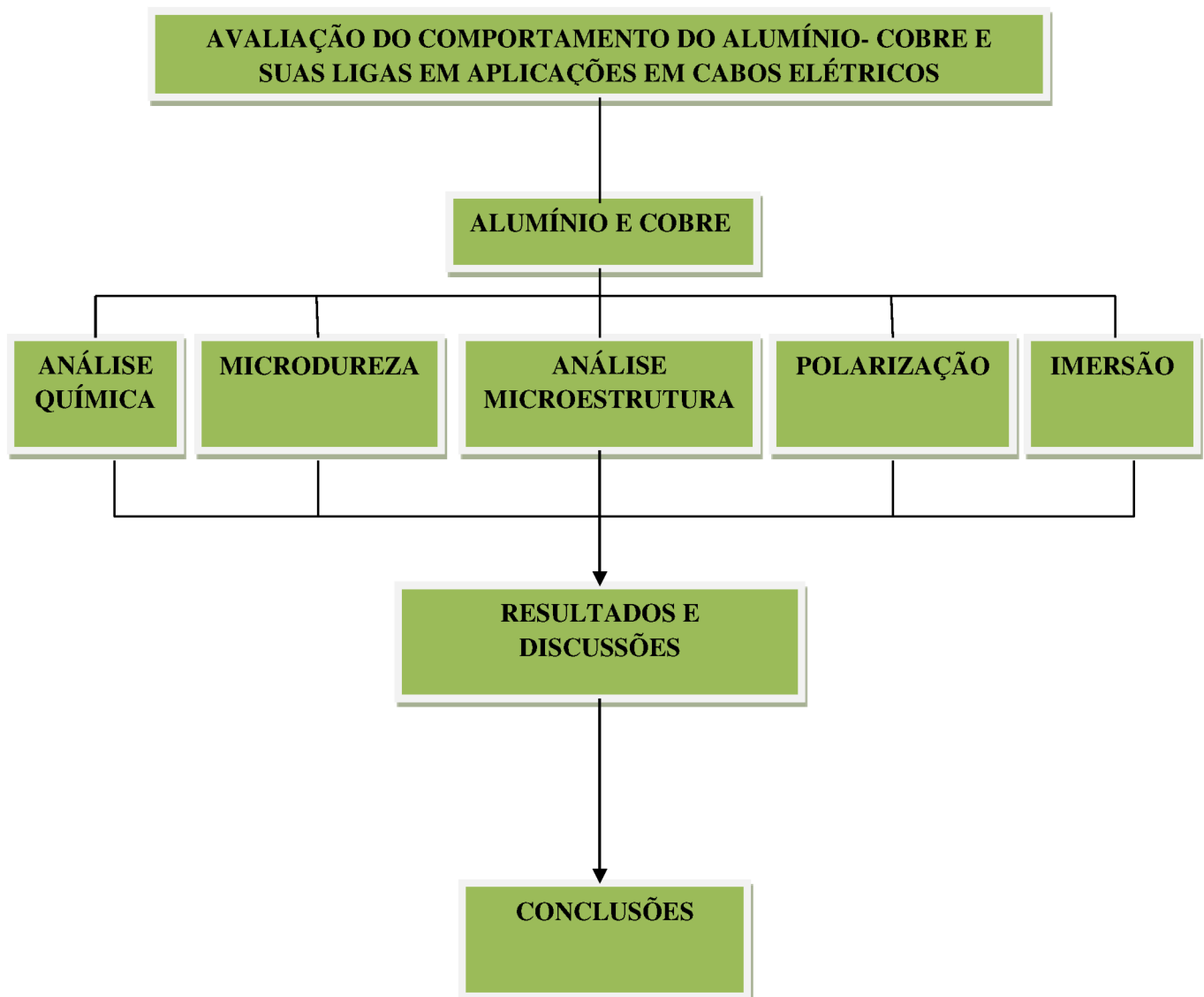
Figura 3 - Detalhes da célula eletroquímica e do arranjo experimental



Fonte: LIBERTO/2004.

3. METODOLOGIA

A metodologia aplicada está indicada no fluxograma abaixo:



Fonte: Elaborada pelo autor

3.1 Análise Química.

Foram utilizados cabos de energia elétrica 4 mm² de alumínio com 7 anos de uso na rede e cabo novo e também cabo em cobre com 5 anos de uso na rede e novo, para caracterização das suas propriedades mecânicas e metalúrgicas.

A análise química foi obtida por espectrometria e emissão óptica marca OXFORD. Os dados foram comparados com as especificações indicadas na tabela abaixo.

CAA-Conductor de Alumínio com alma em Aço Zincado-Alumínio-liga Al 1350-H19



Fonte: Elaborada pelo autor

CC-Conductor de Cobre-Fios de liga de cobre-cromo-zircônio (CuCrZr) em uma composição estabelecida em Cu-0,7%Cr-0,1%Zr (em massa)



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2 Microdureza.

As análises e Microdureza foram realizadas em microdurômetro SHIMADZU HV2. Foi utilizado um penetrador tipo Vickers com carga de 0,3 kg com 10 segundos a partir do centro da seção transversal do cabo. As amostras foram lixadas e polidas.

3.3 Análise Microestrutura.

As amostras após cortadas foram embutidas, tanto o alumínio em uso, como o novo e também a amostra de cobre usada e nova.

As amostras foram lixadas em lixas d'águas na seguinte ordem de granulometria: 120, 220, 400, 500, 600, 800, 1000, onde as amostras sofreram rotação de 90° a cada mudança de lixa. Após este processo, as amostras foram polidas em misturas de alumina 1 µm com água, até se obter uma superfície polida o suficiente para não ter detectado nenhum risco no microscópio óptico.

3.4 Polarização

Foi utilizada a técnica da polarização potenciodinâmica à base de Cloreto de sódio.

3.5 Imersão.

Foram utilizados ensaios de imersão para verificação do comportamento do material na condição de supersaturação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise Química.

Na tabela 12 e 13 abaixo podem ser verificadas as composições químicas das ligas de Alumínio e Cobre das amostras pesquisadas respectivamente.

Tabela 12 - Composição Química do Alumínio estudado

Amostra	%Al	%							
Alumínio	98								

Tabela 13 - Composição Química do Cobre estudado

Amostra	%	%							
Cobre	98								

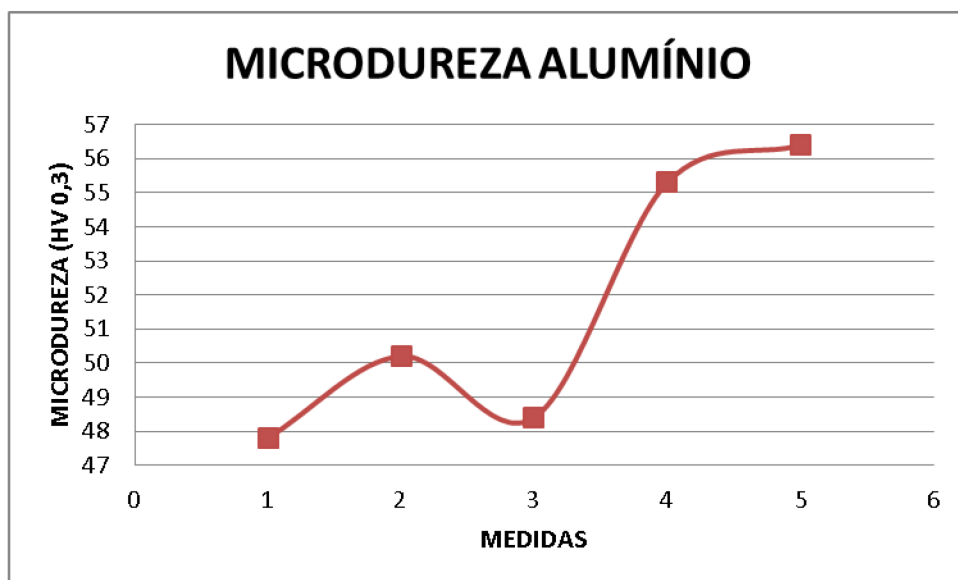
4.2 Microdureza Alumínio, Cobre e Aço.

Os valores da microdureza do Alumínio podem ser visualizados na tabela 14 e no perfil indicado na figura 12.

Tabela 14 – Valores de microdureza Vicker encontrados na amostra de Alumínio

ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS-ALUMÍNIO	
MEDIDAS	MICRODUREZA (HV 0,30)
1º	47,8
2º	50,2
3º	48,4
4º	55,3
5º	56,4

Figura 12 – Perfil de microdureza na amostra de Alumínio estudada.



A dispersão mostrou-se pequena, o que indica que a microdureza encontrada foi uniforme ao longo das seção transversal do cabo de Alumínio. Os valores encontram-se dentro do verificado nos trabalhos referenciados [1,2 e 3].

O principal mecanismo de endurecimento desta classe de alumínio é deformação plástica, não sendo a mesma endurecida por tratamento térmico. Os picos mais elevados de microdureza não representaram valores significativos em resistência mecânica do material [1]. Os valores de microdureza evidenciam a baixa resistência dos cabos e a necessidade da utilização de alma de aço para aumento da resistência do conjugado.

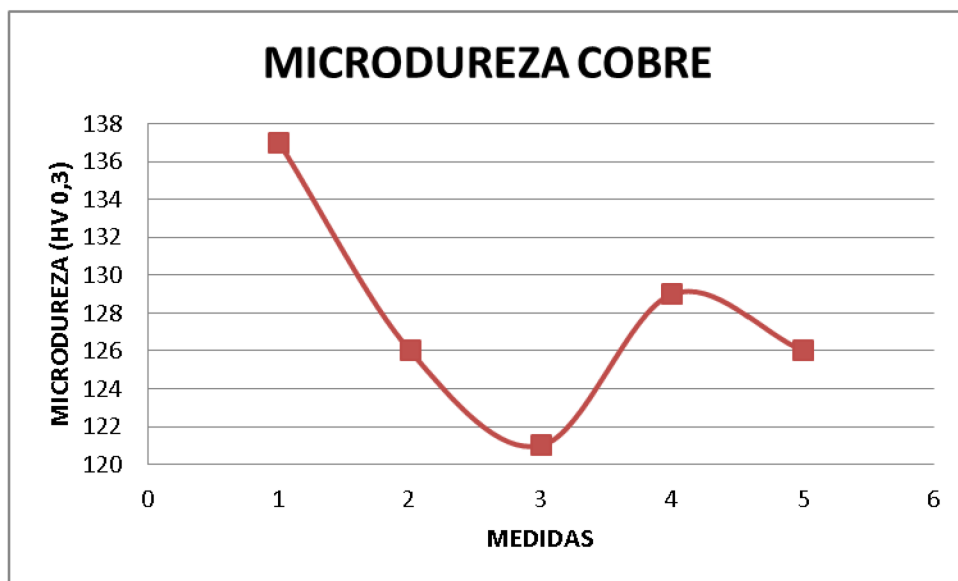
Na tabela 15, podem ser visualizados os valores da microdureza do Cobre. Os valores encontrados indicam aumento da resistência mecânica por deformação plástica (encruamento). Os mecanismos de endurecimentos com adição de elementos de liga e refino de grão não foram aplicados a classe de Cobre estudada [4].

Tabela 15 – Microdurezas encontradas nas amostras analisadas.

ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS-COBRE	
MEDIDAS	MICRODUREZA (HV 0,30)
1ª	137
2ª	126
3ª	121
4ª	129
5ª	126

Na figura 13 podem ser visualizados os valores de dureza originadas pelo encrimento do material.

Figura 13. Valores de microdureza encontrada nas amostras de Cobre.



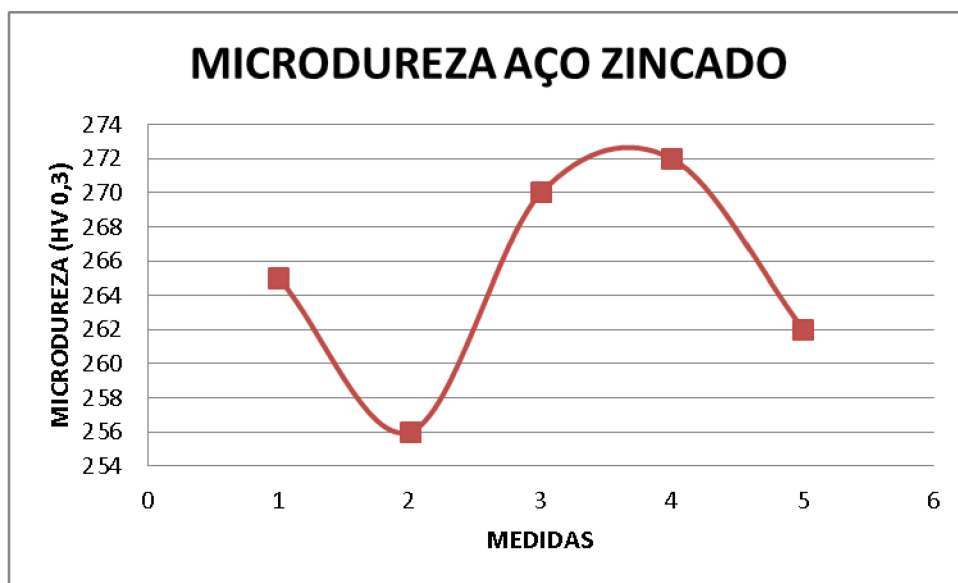
Na tabela 16, podem ser visualizados os valores de microdureza Vickers, da “alma” que atua em conjugado com o Alumínio. Os valores são expressivamente superiores ao encontrado na liga não ferrosa, sendo a sua resistência mecânica obtida por deformação plástica [5].

Tabela 16 – Valores de microdureza Vickers do substrato de aço.

ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS-AÇO ZINCADO	
MEDIDAS	MICRODUREZA (HV 0,30)
1ª	265
2ª	256
3ª	270
4ª	272
5ª	262

No perfil de microdureza verifica-se valores mais elevados junto a superfície das amostras de aço, situação tipicamente encontrada em materiais deformados a frio [6].

Figura 14 – Microdureza da “alma” de aço.

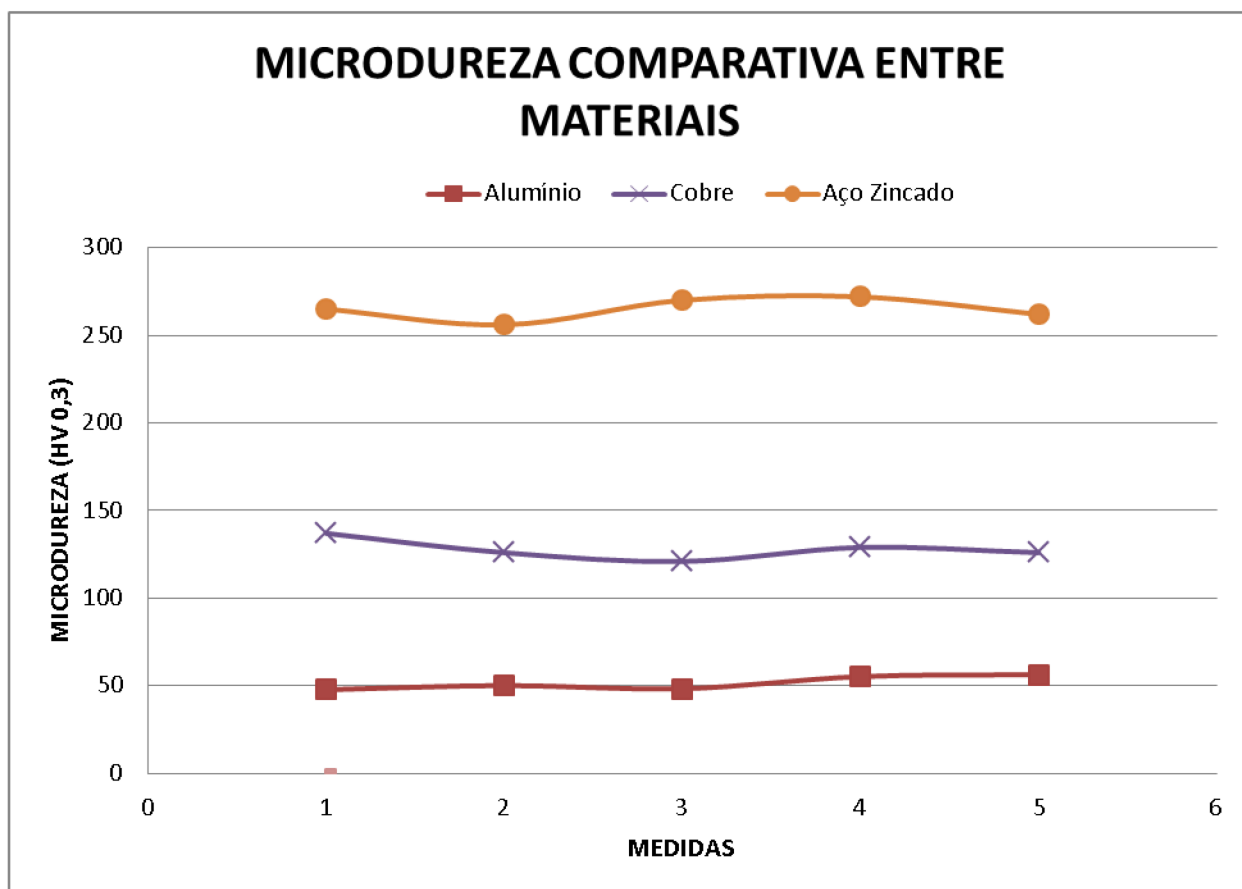


Para melhor visualização dos resultados, na tabela 17 e figura 15 verifica-se o comportamento de microdureza das amostras estudadas. Os valores evidenciam a necessidade da “alma” de aço para a sustentação dos cabos, conforme verificado nos referenciais [6 e 7].

Tabela 17 – Tabela com os dados comparativos da microdureza dos três materiais.

ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS-COMPARATIVO ENTRE MATERIAIS			
MEDIDAS	ALUMÍNIO (HV 0,30)	COBRE (HV 0,30)	AÇO ZINCADO (HV 0,30)
1º	47,8	137	265
2º	50,2	126	256
3º	48,4	121	270
4º	55,3	129	272
5º	56,4	126	262

Figura 15 – Valores de microdureza do Alumínio, Cobre e Aço, de forma comparativa.



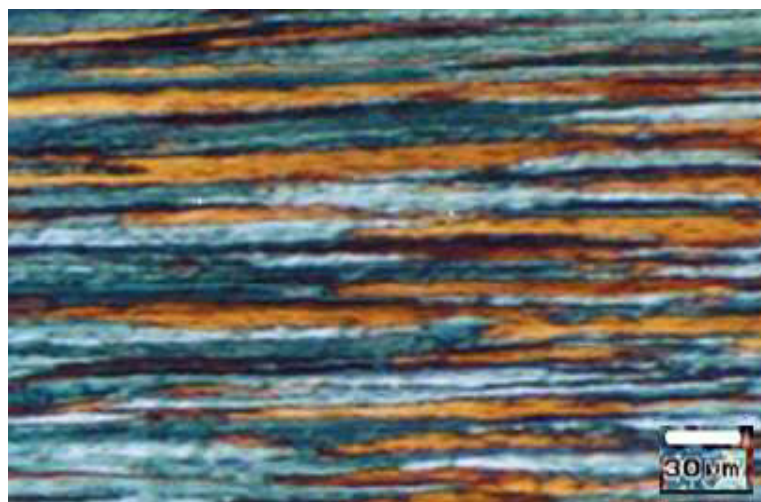
4.3 Análise Microestrutura.

As microestruturas das amostras de Alumínio, Cobre e Aço apresentaram deformação plástica no sentido da conformação a frio, visto que os três materiais não apresentavam originalmente condições de serem endurecidos por outro mecanismo [7]. Na figura 16 pode ser visualizada a microestrutura de Alumínio, com grão no formato colunar.

Figura 16 – Grão colunar de Alumínio.



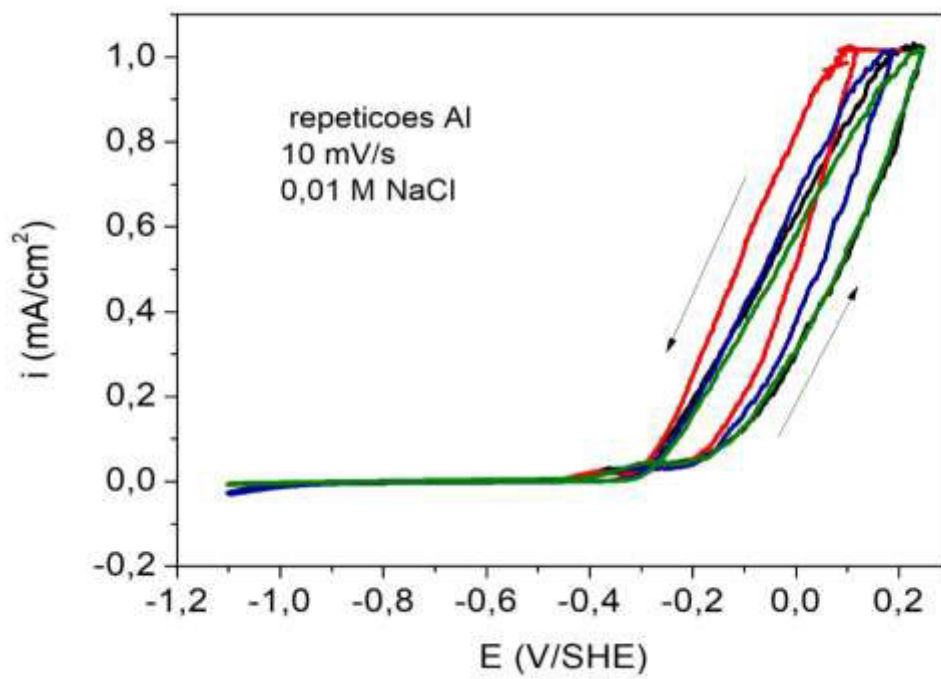
Nas amostras de Cobre evidenciou-se mais deformação na microestrutura, maior dificuldade a movimentação das discordâncias e em consequência aumento na resistência mecânica [8]. Na figura 17 verifica-se grãos tensionados de Cobre.



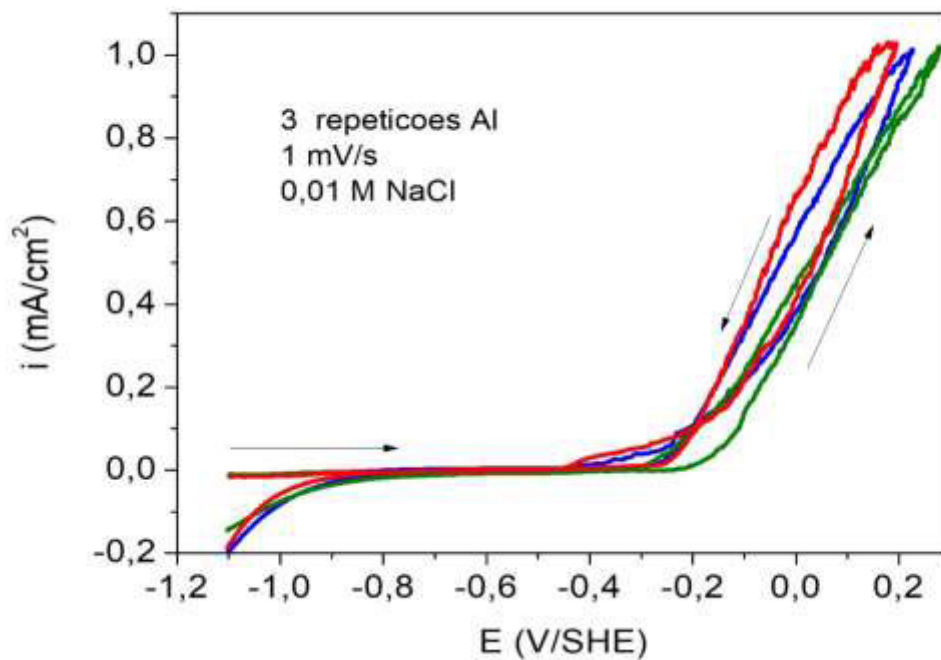
4.4 Polarização.

ALUMÍNIO

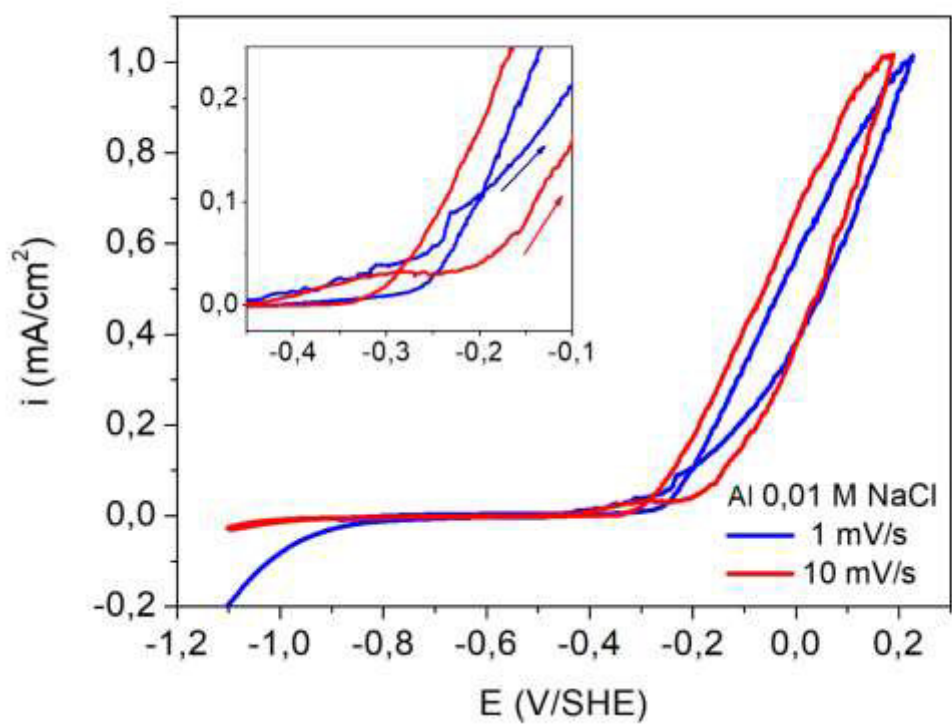
10 mV/s - 1 fio Al



1 mV/s - 1 fio Al

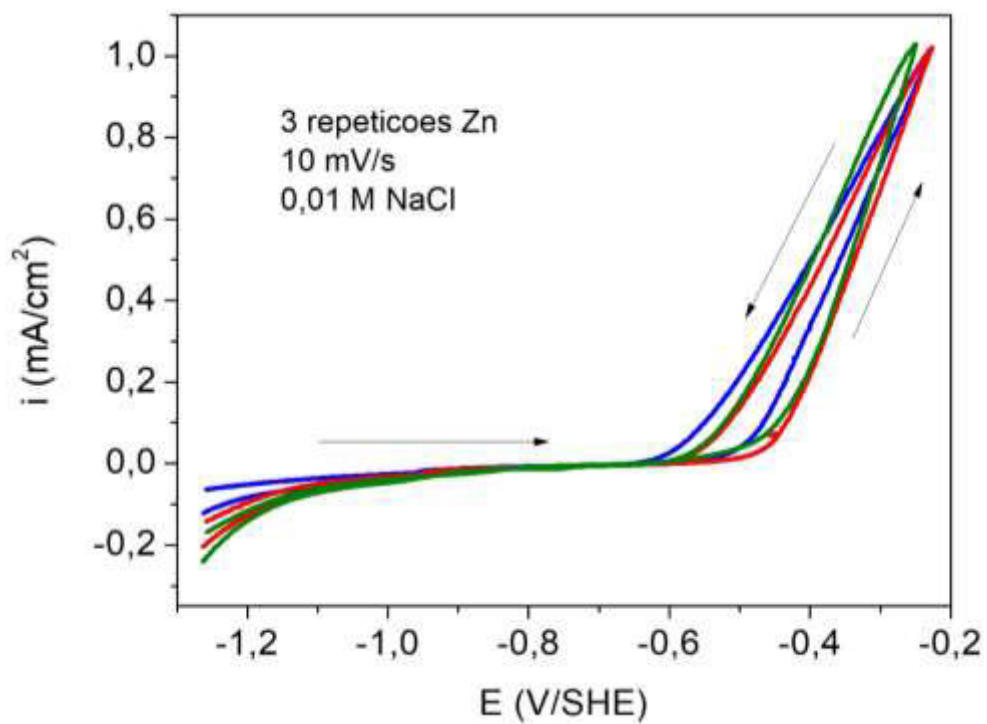


Comparando 10 mV/s e 1 mV/s - 1 fio Al

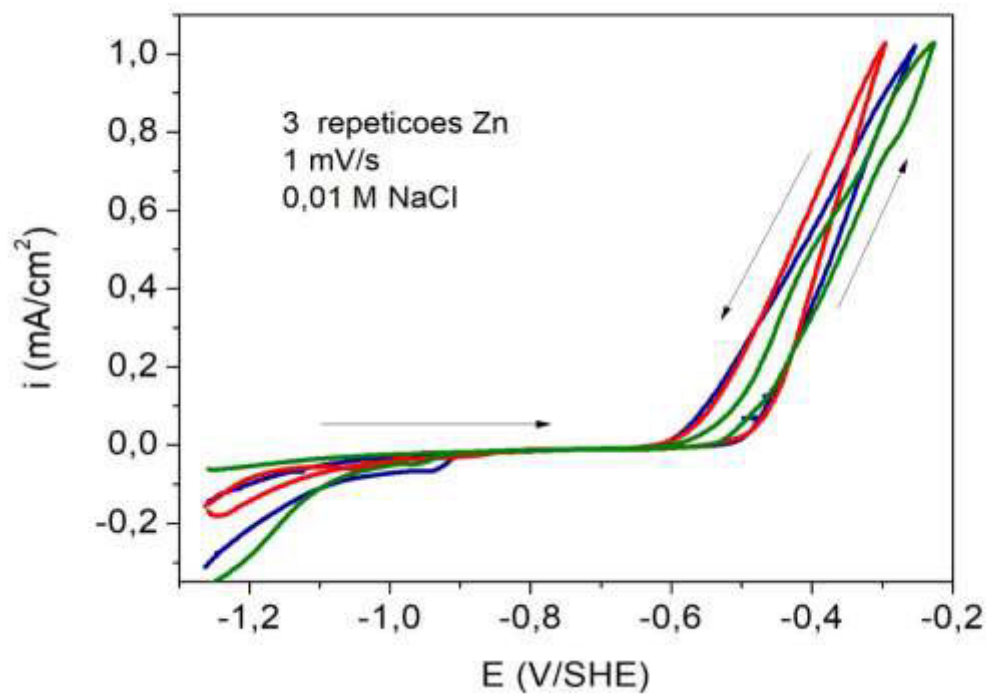


ZINCO

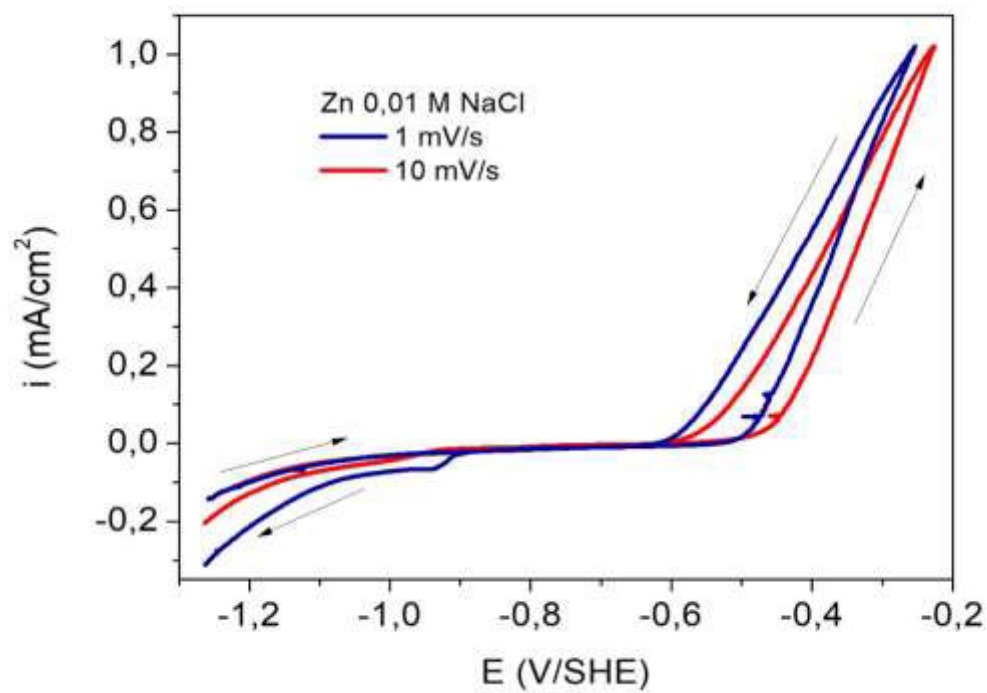
10 mV/s - 1 fio Zn



1 mV/s - 1 fio Zn



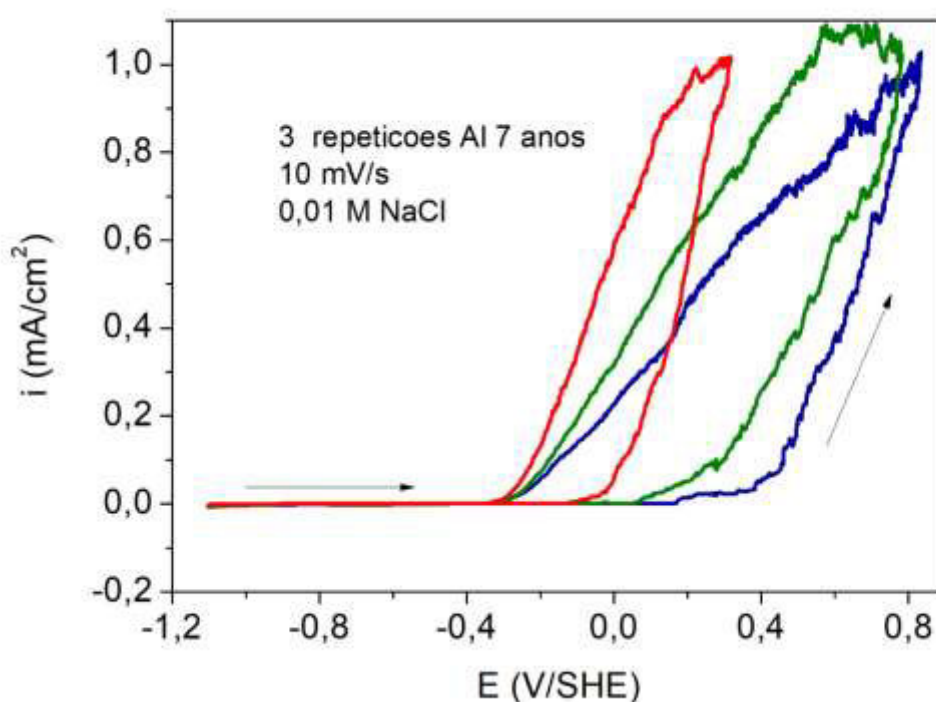
Comparando 10 mV/s e 1 mV/s - 1 fio Zn



ALUMÍNIO 7 anos

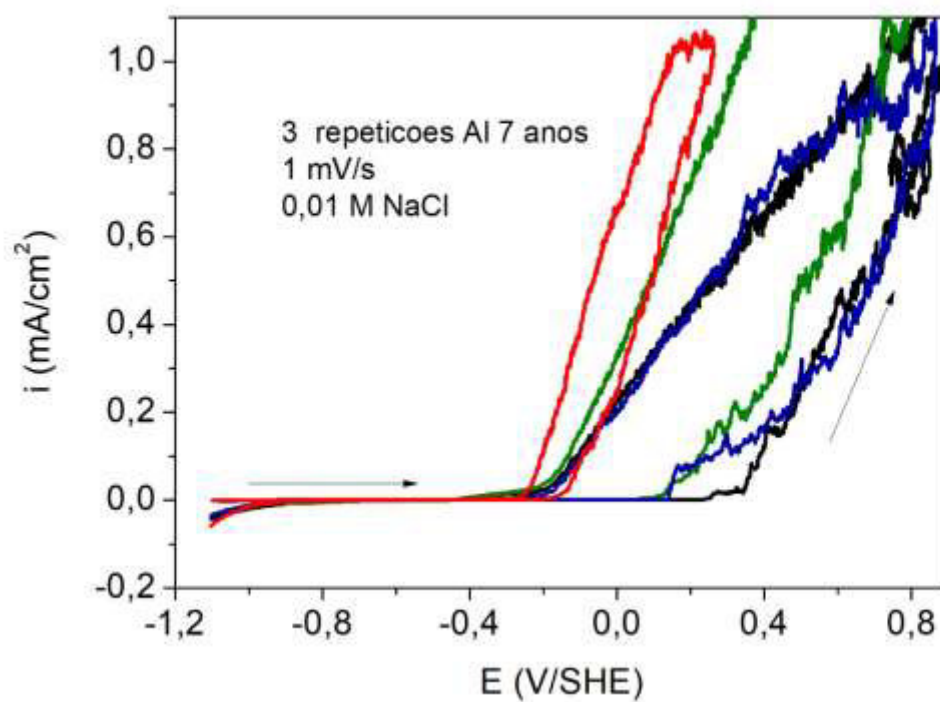
Obs.: Os experimentos com amostras já corroídas foram mais difíceis de reproduzir. Tentei ao máximo pegar amostras parecidas.

10 mV/s - 1 fio Al

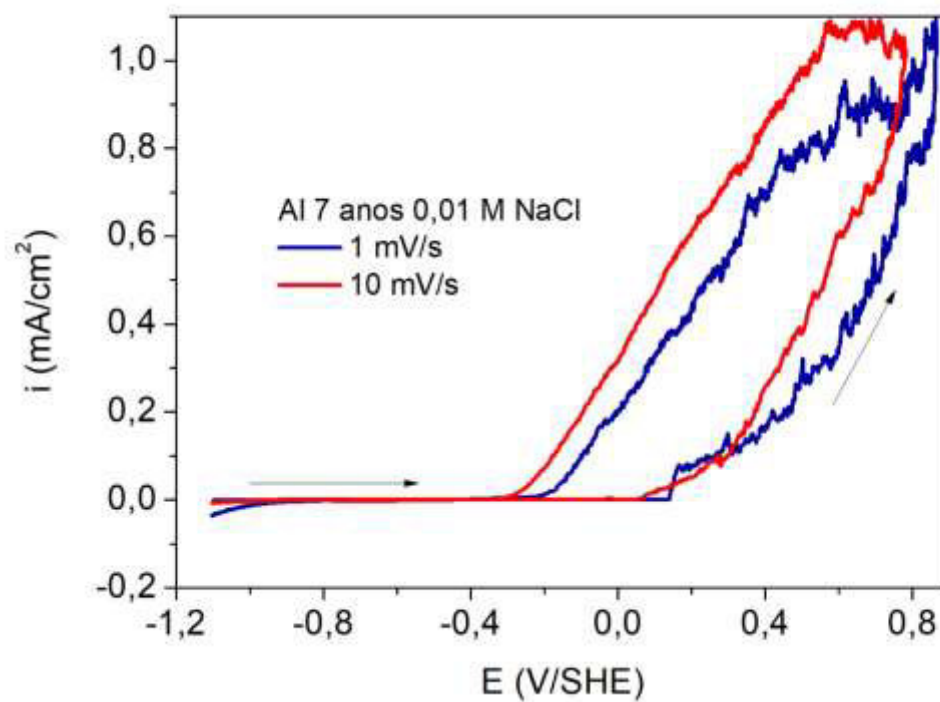


1 mV/s - 1 fio Al

Obs.: As curvas verde e preta ultrapassaram o limite de corrente estabelecido. Provavelmente eu esqueci de setar no programa. Plotei os gráficos mesmo assim, pois a curva de ida não altera (pode ser considerada apenas para verifica o Epit)

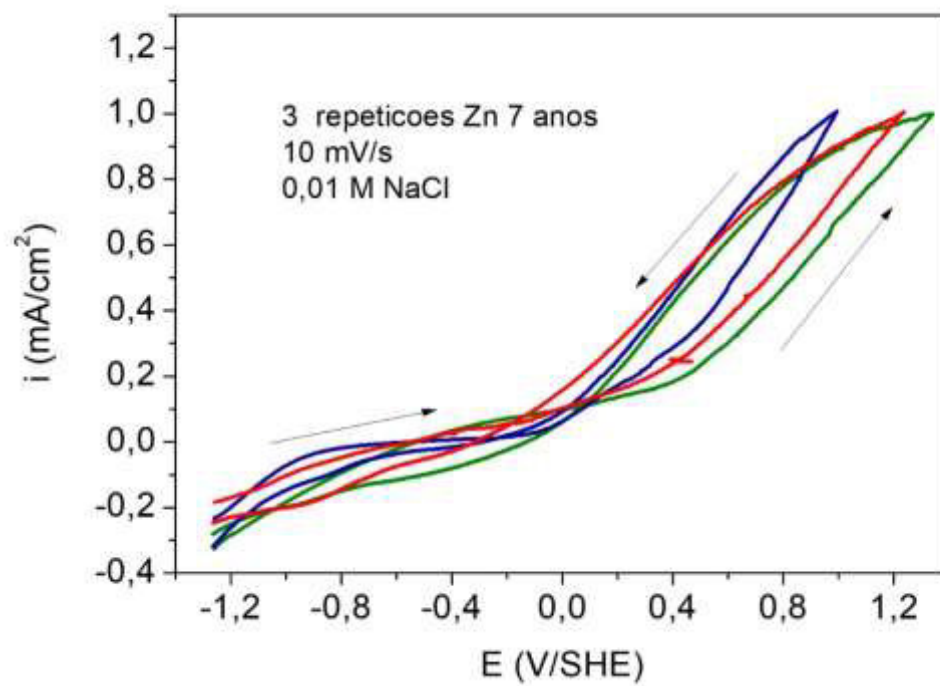


Comparando 10 mV/s e 1 mV/s - 1 fio Al

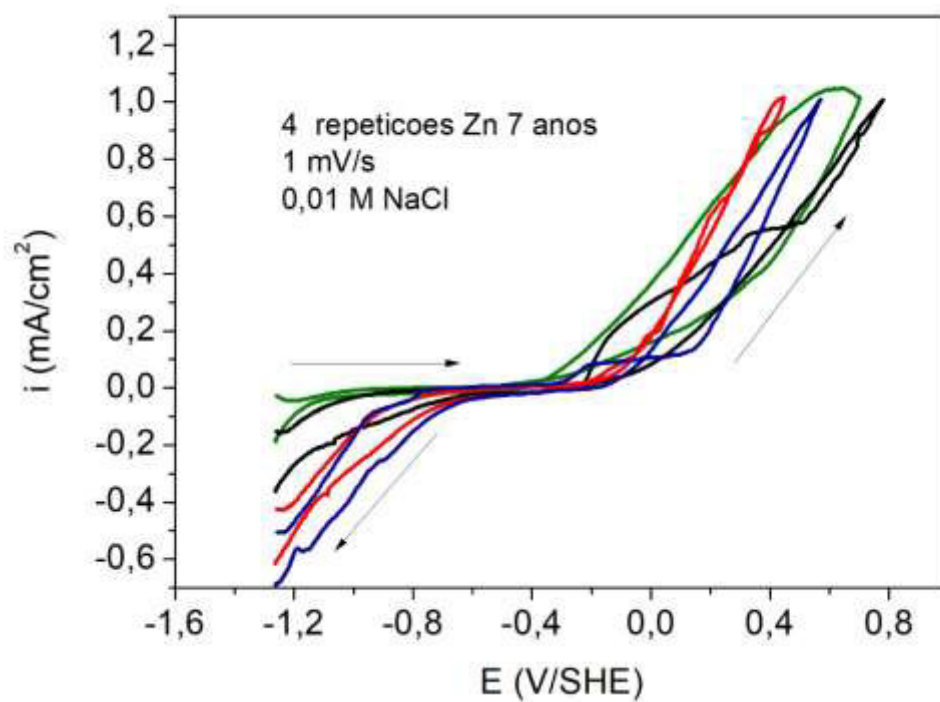


ZINCO 7 anos

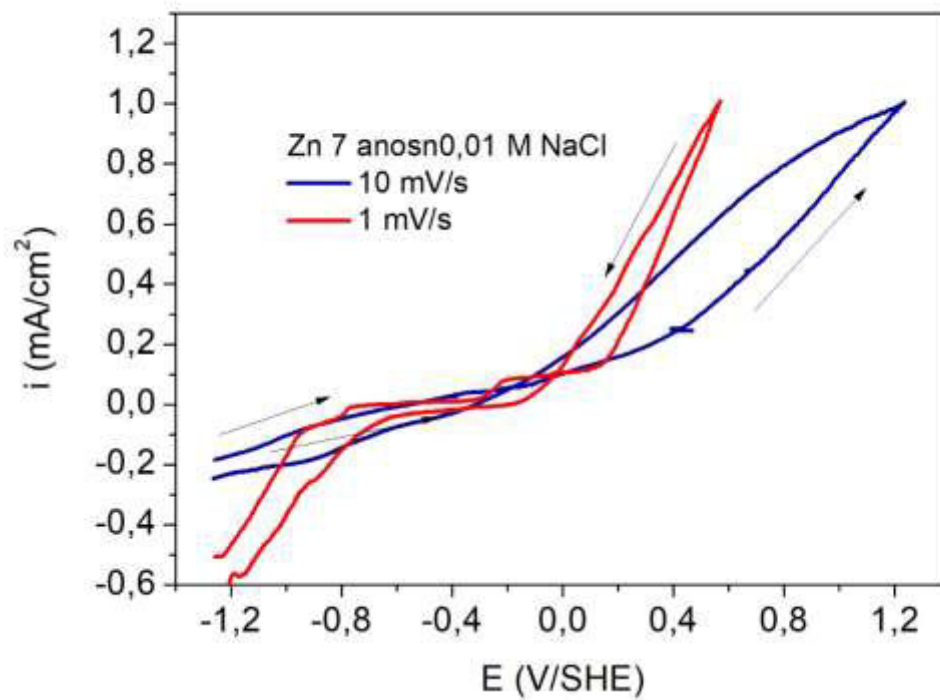
10 mV/s - 1 fio Zn



1 mV/s - 1 fio Zn

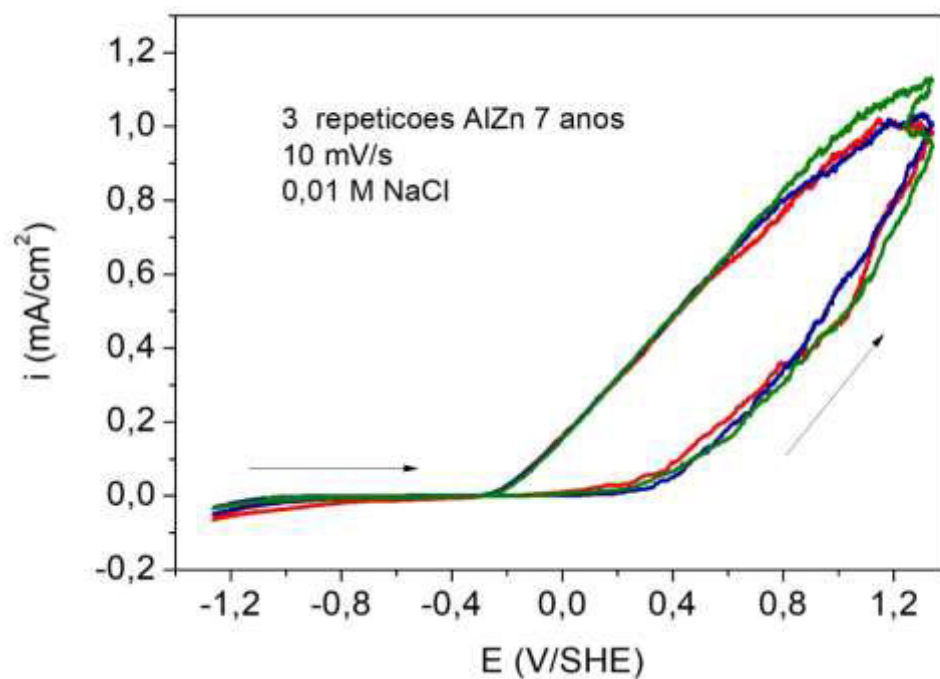


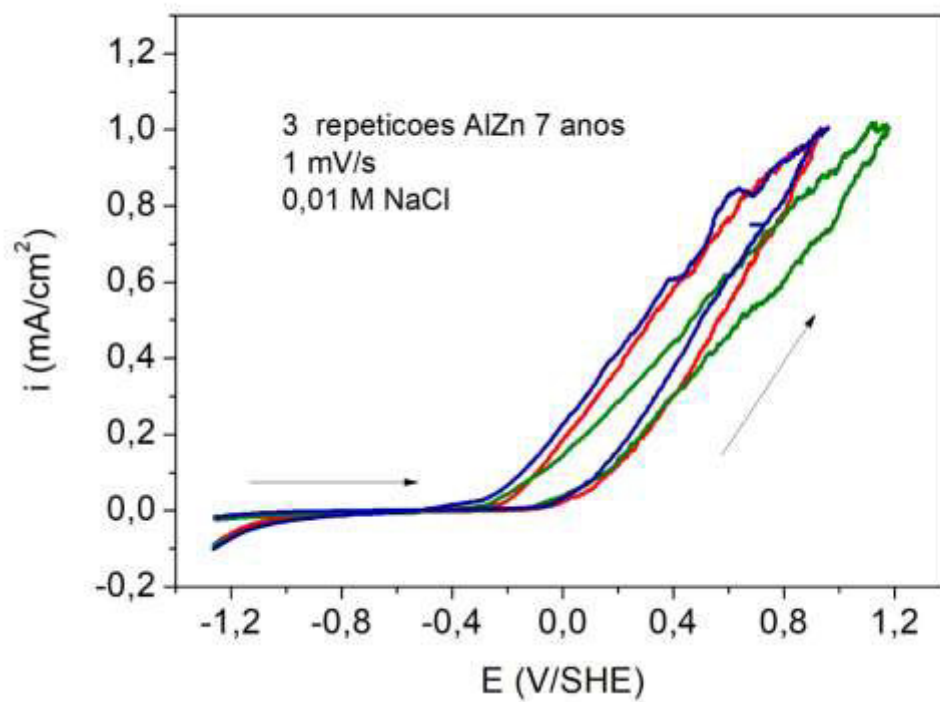
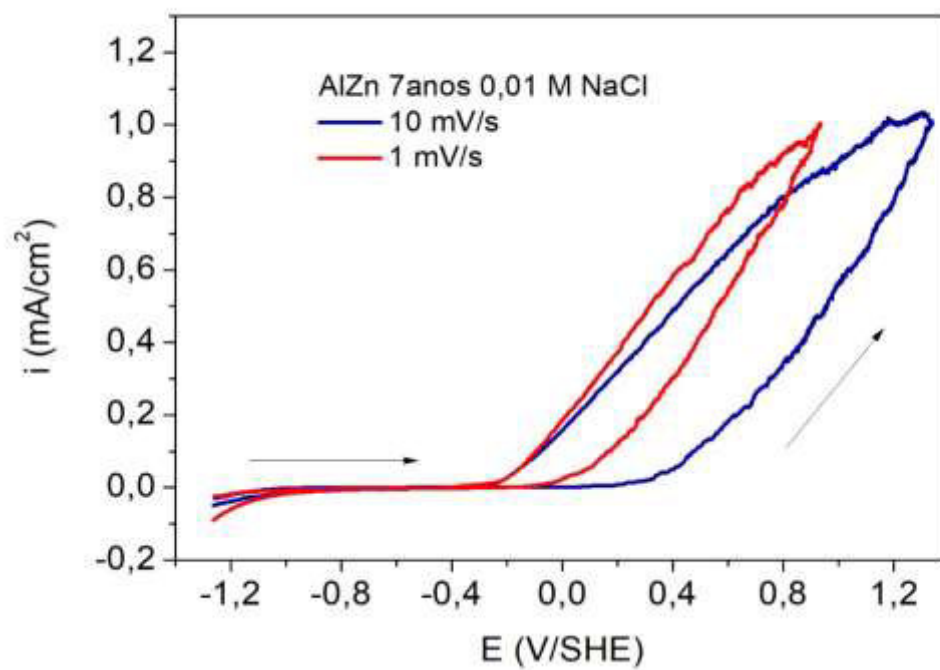
Comparando 10 mV/s e 1 mV/s - 1 fio Zn



ALUMÍNIO-ZINCO 7 anos

10 mV/s – 6 fios Al e 1 fio Zn (Cabo)



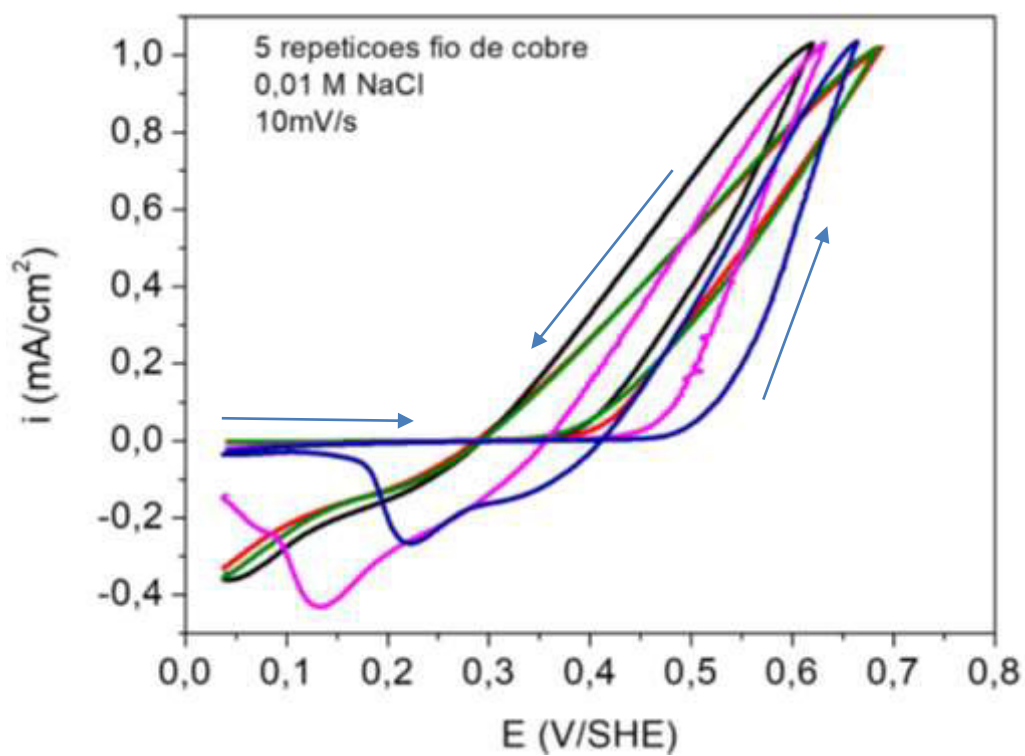
1 mV/s – 6Al1Zn**Comparando 10 mV/s e 1 mV/s – 6Al1Zn**

Obs.: Assim que vocês decidirem quais gráficos irão para a dissertação, me avisem que passo eles para a forma final.

Façam uma lista com as correções que acharem pertinentes.

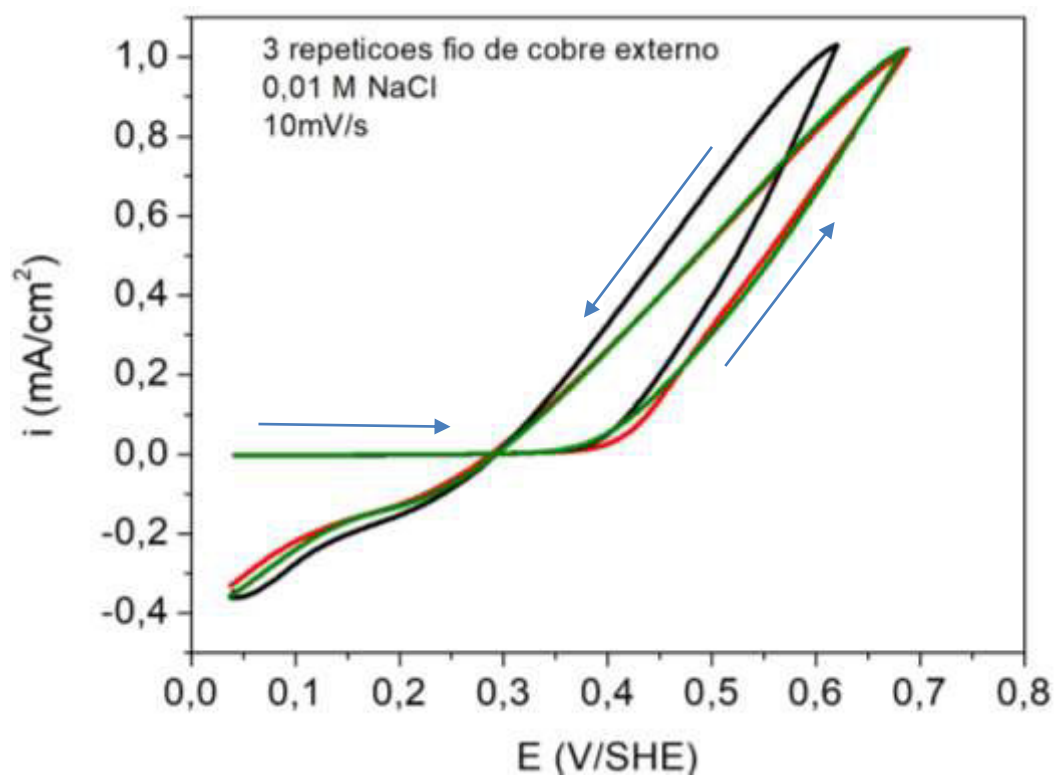
COBRE

10 mV/s

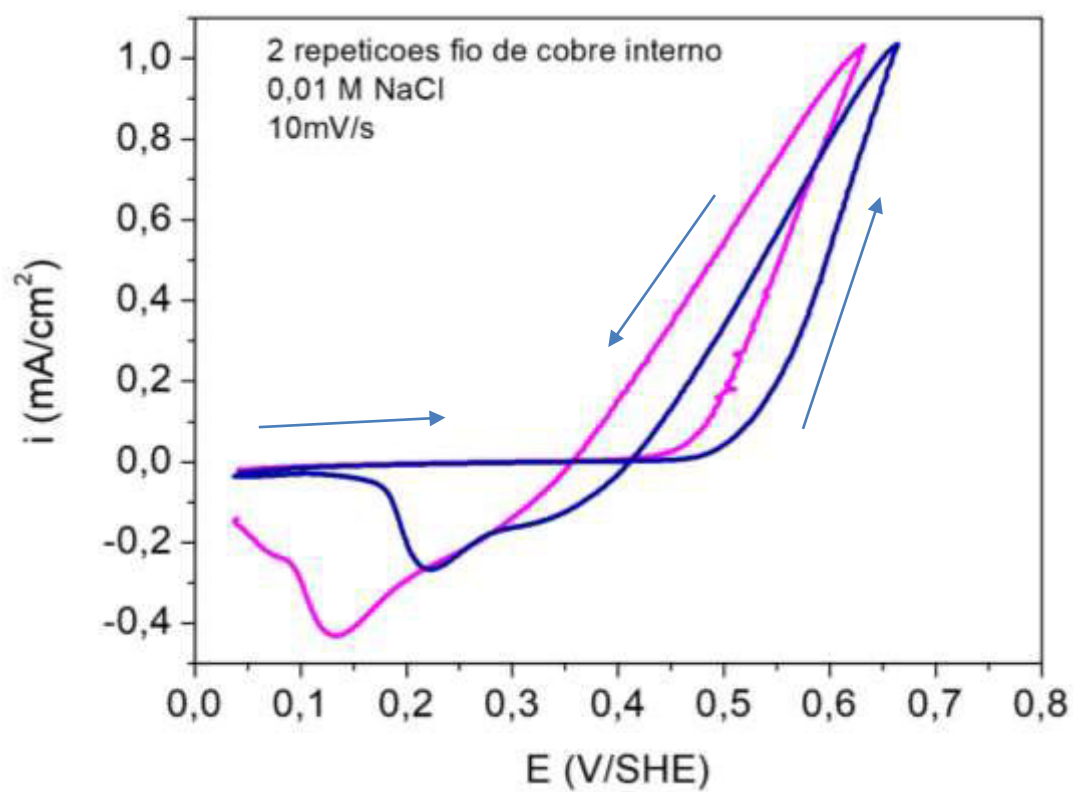


10 mV/s fio de cobre externo

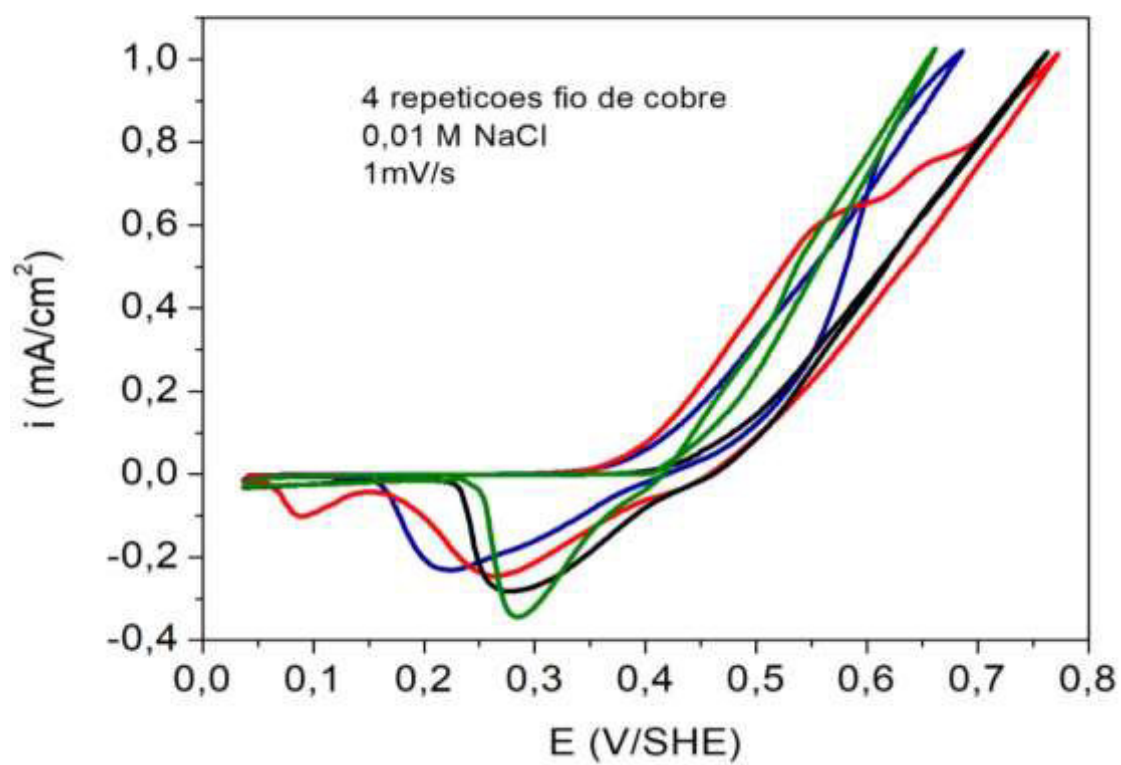
Obs.: Semana que vem conversamos pessoalmente. Quero te mostrar a diferença entre o fio interno e externo



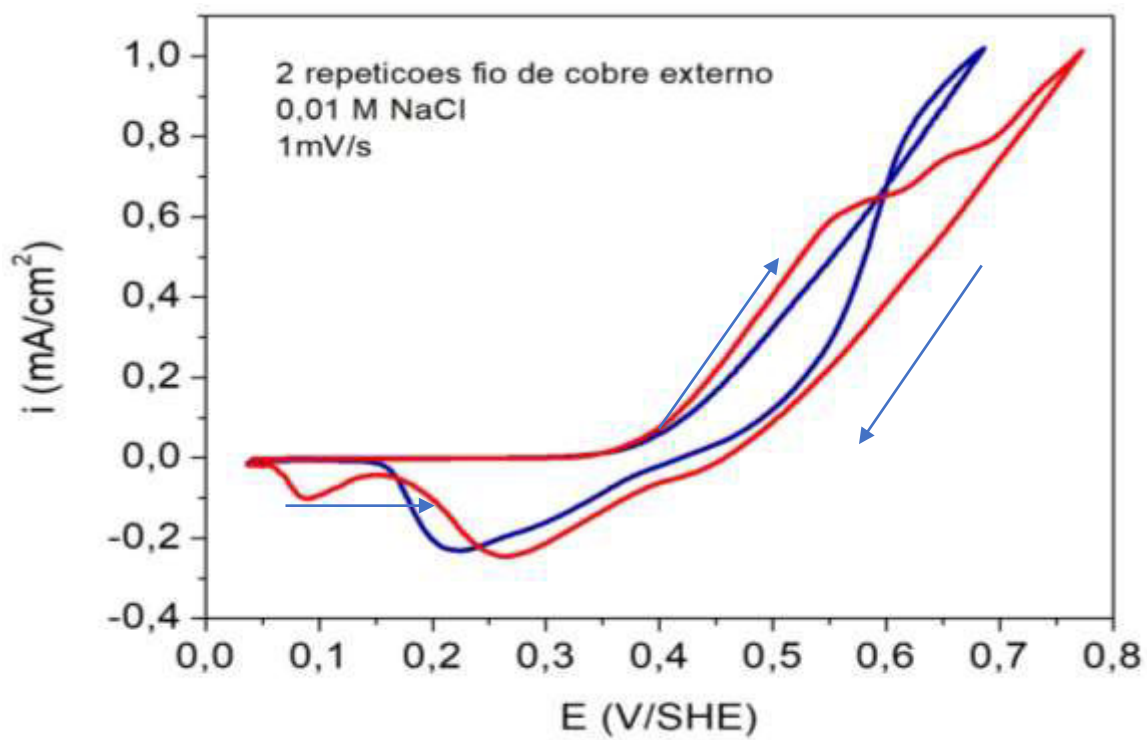
10 mV/s fio de cobre interno



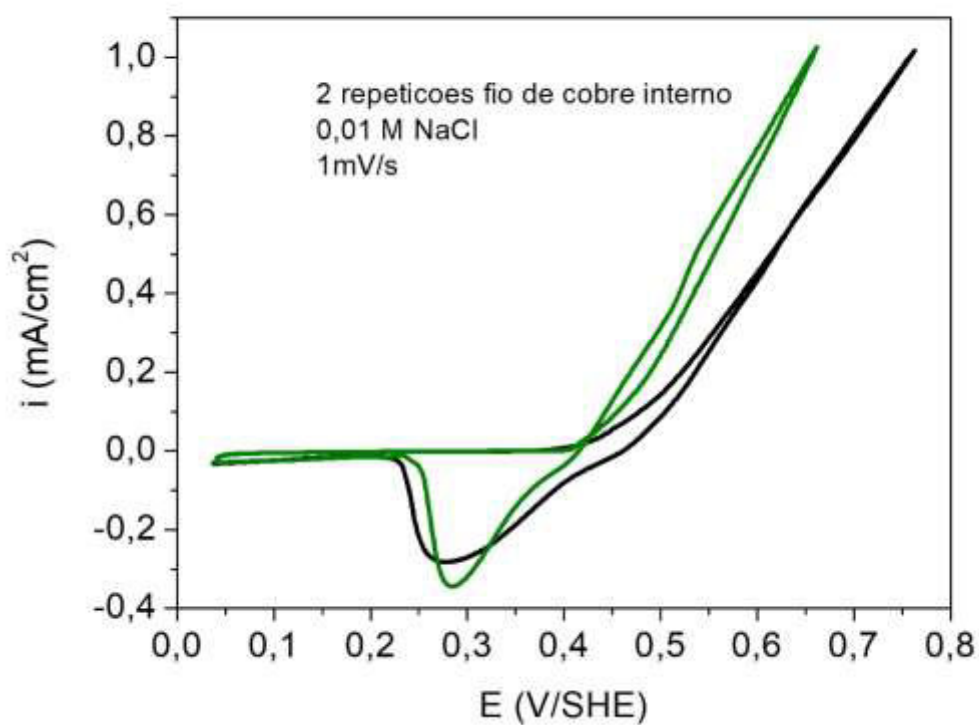
1 mV/s fio de cobre



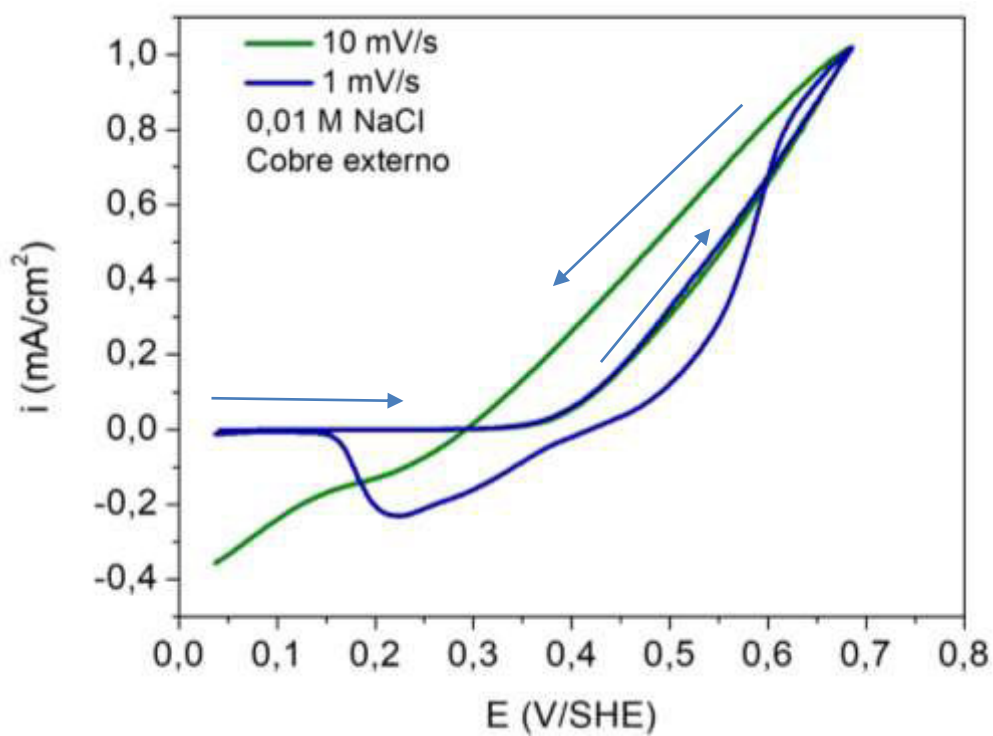
1 mV/s fio de cobre externo



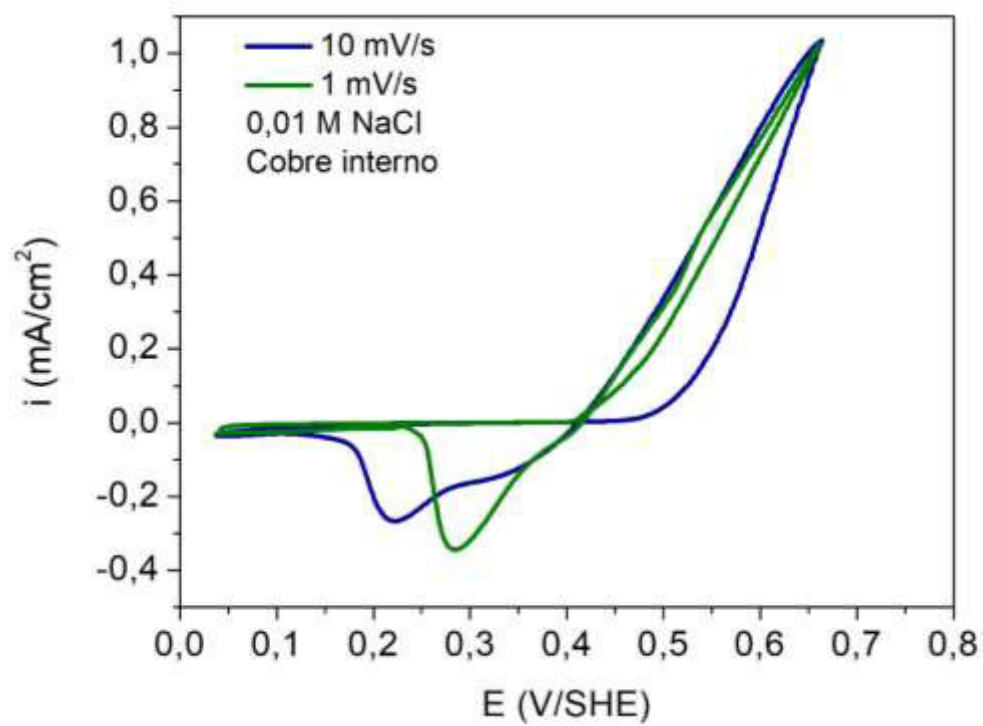
1 mV/s fio de cobre interno



Comparando 10 mV/s e 1 mV/s fio de cobre externo

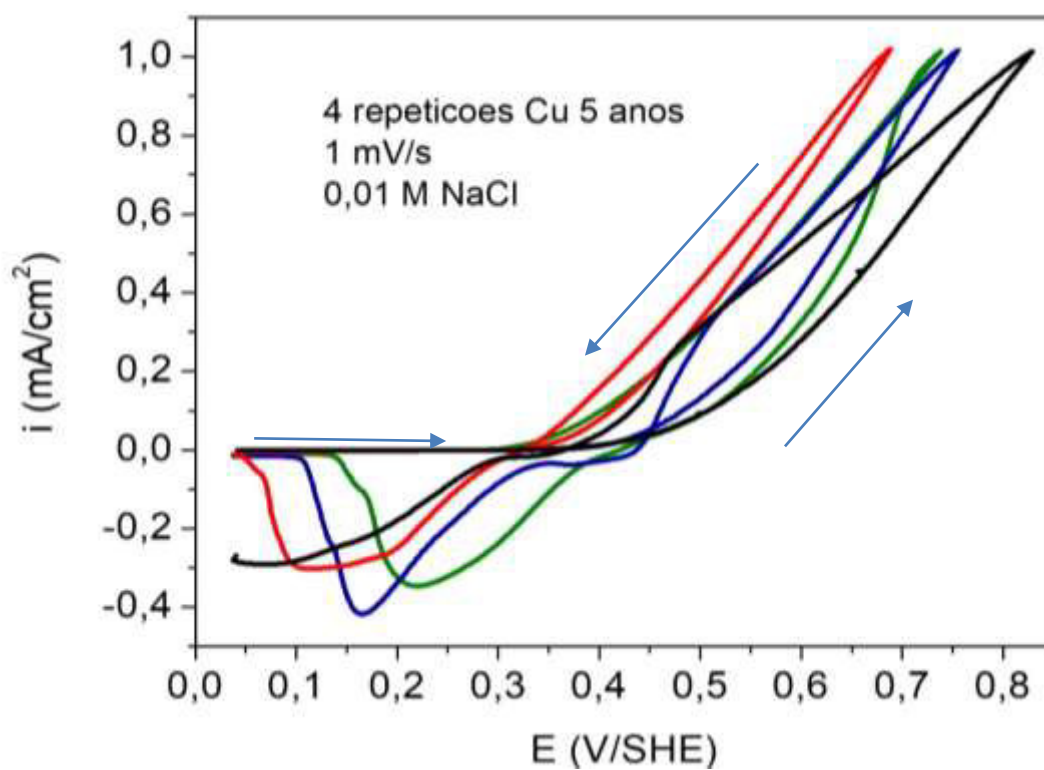


Comparando 10 mV/s e 1 mV/s fio de cobre interno

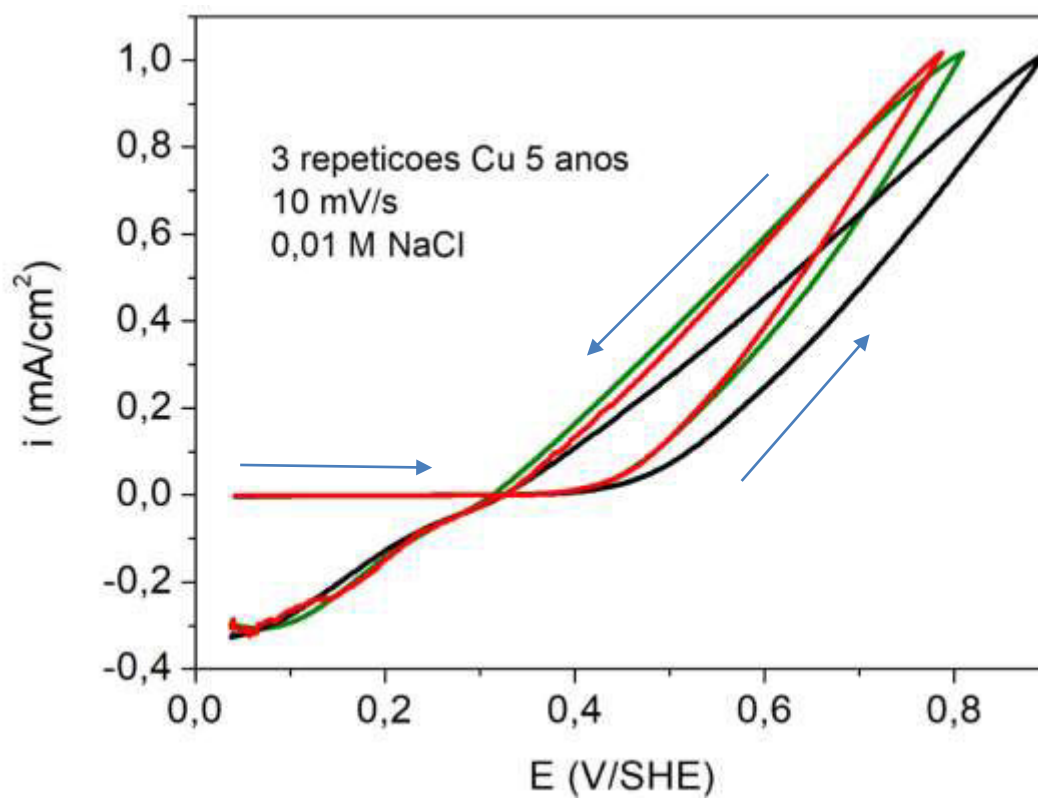


COBRE 5 ANOS

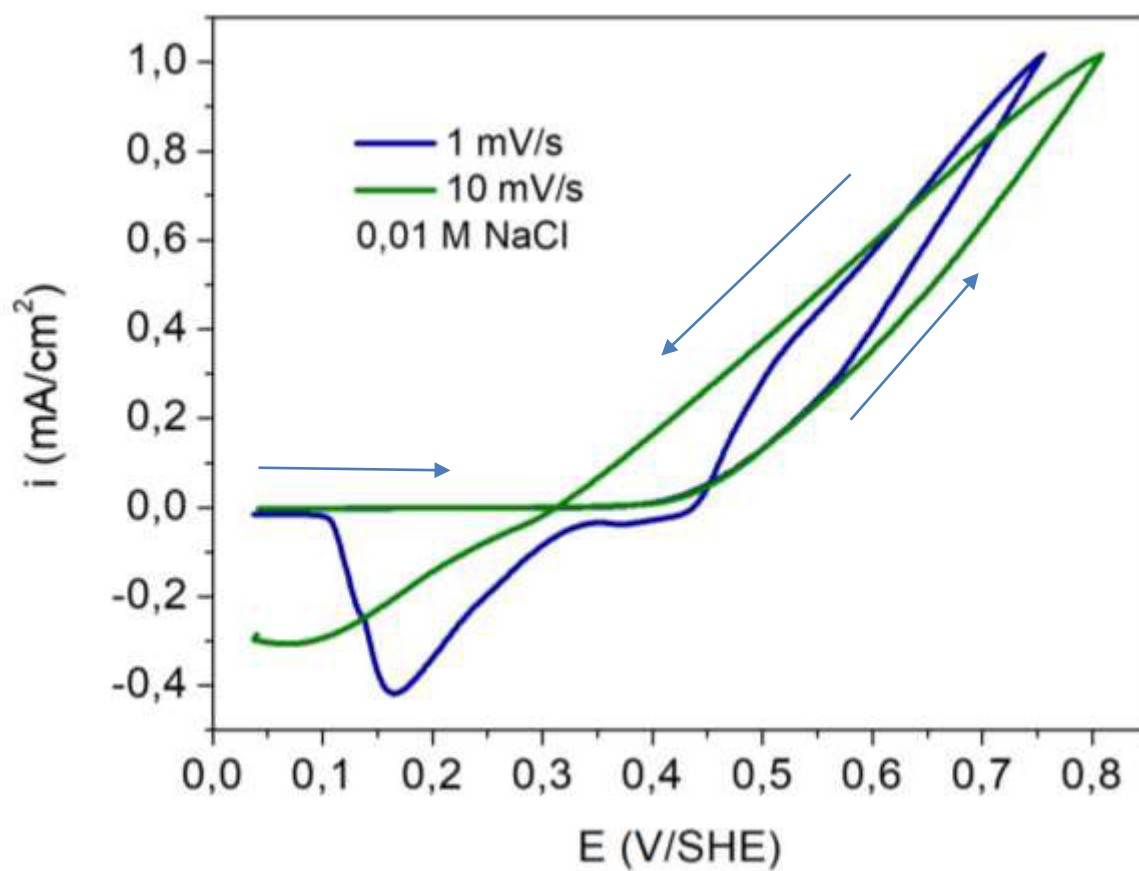
10 mV/s



1 mV/s



Comparando 10 mV/s e 1 mV/s



Obs.: Não fiz a comparação dos fios de Cu internos com os externos, pois ambos estavam bastante corroídos. E também por falta de tempo.

4.5 Imersão.

OS RESULTADOS

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos concluímos que:

- ✓ As ligas de Alumínio e Cobre apresentaram elevado grau de corrosão, com o passar do tempo;
- ✓ O Alumínio Puro e o Cobre Puro apresentaram resistência à corrosão superior as suas ligas;
- ✓ A resistência mecânica do conjunto Alumínio e alma de aço e obtida pela maior resistência mecânica;
- ✓ A resistência mecânica do cobre foi obtida por deformação plástica (encruamento);

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

✓

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GENTIN, V., **Corrosão. 3. Ed.** Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos S.A., 1996.

“Corrosion costs and preventive strategies in the United States of America”. In: <http://www.NACE.org>. 2002.

WEST, J.M. **Electrodeposition and Corrosion Processes**. The Camelot Press, LTDA, 1965.

GENTIL, V.; **Corrosão. 4.a edição**, Ed. LTC: Rio de Janeiro, 2003, 53 p.

VIANA R. O.; **O programa de corrosão atmosférica desenvolvido pelo CENPES**. Boletim técnico PETROBRAS, V. 23, n. 1, p. 39-47, 1980.

DE SOUZA JR, João et al. **Avaliação da degradação de conexões em subestações para desenvolvimento de um sistema de monitoramento em tempo real**.

RIEDER, Ester Schmidt et al. Investigação dos principais processos de corrosão em estações de energia elétrica do Estado do RS. **Revista matéria. Rio de Janeiro**. Vol. 14, n. 3 (3º trimestre 2009), p. 1000-1014, 2009.

PADILHA, Hélio; PAREDES, Ramón SC. **REVESTIMENTOS DE COBRE, BRONZE ALUMÍNIO E ALUMÍNIO/NIQUEL DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA SOBRE SUBSTRATO DE ALUMÍNIO PARA MELHORAR O DESEMPENHO DE CONEXÕES ELÉTRICAS**. 2011.

BRAUNOVIC, M., **Aluminum Connections: Legacies of the Past**. In: IEEE Conference of Electrical Contacts, 40.1994.

MAIA, Joana et al. **Avaliação da corrosão em cabos de pré-esforço com base na resistência elétrica**.

SILVA, ELZIANE A. et al. **CORROSÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO: UMA SOLUÇÃO DE MONITORAÇÃO ON-LINE DE BAIXO CUSTO.** *Revista de Controle e Automação*, v. 1, n. 1, 2013.

SEBRAO, Mauro Zanini et al. **COTEQ-158 DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA DETECÇÃO REMOTA DE CORROSÃO INTERNA EM CABOS CONDUTORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.** 2009.

PORTELLA, Guilherme D. **Taxa de degradação de estruturas metálicas e de concreto em ambientes litorâneos do sul e do nordeste do Brasil: estudos de caso em Pontal do Paraná, PR e Salvador, BA.** 2011.

BRAMBILLA, Kelly Jacqueline Campos. **Investigação do grau de corrosividade sobre materiais metálicos das redes aéreas de distribuição de energia elétrica (RD) da Região Metropolitana de Salvador-BA.** 2012.

Sebrao, M. Z., Lourenço, C. R. S., Sant'anna, I., Saad Jr, J., Lourenço, P. M., Wavrik, J. F., & Moreira, P. L. (2009). **COTEQ-158 DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA DETECÇÃO REMOTA DE CORROSÃO INTERNA EM CABOS CONDUTORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.**

DE ENERGIA ELÉTRICA, **Linhas de Transmissão. Corrosão Interna em Cabos Condutores de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: Caracterização da Atmosfera e Técnica para Identificação de Falhas.**

DE MIRANDA, João Maria Rodrigues; DE OLIVEIRA, Silvio César Farias. **Experiências e Testes com Materiais em Áreas de Ambientes com Agressividade Salina.** XVII SENDI, 2007.

RODRÍGUEZ, J. J. S. et al. **The effect of environmental and meteorological variables on atmospheric corrosion of carbon steel, copper, zinc and aluminium in a limited geographic zone with different types of environment.** *Corrosion Science* (In Press), V. 44, p. 0-0, 2002.

CASTAÑO, J. G. et al. **Atmospheric corrosion of carbon steel in Colombia.** *Corrosion Science*, v. 52, p. 216-223, 2010.

NÚÑEZ L. et al. **Corrosion of copper in seawater and its aerosols in a tropical island**, *Corrosion Science*, n. 47, pp. 461-484, 2005.

KATAYAMA, H. et al. **Corrosion simulation of carbon steels in atmospheric environment.** *Corrosion Science*, v. 47, p. 2599-2606, 2005.

YUANTAI, M. et al. **The atmospheric corrosion kinetics of low carbon steel in a tropical marine environment**. Corrosion Science, v.52, p.1796 – 1800, 2010.

LAN, T. T. N. et al. **Atmospheric corrosion of carbon steel under field exposure in the southern part of Vietnam**. Corrosion Science, v. 48, p. 179-192, 2006.

VERA, R. et al. **Effect of unusually elevated SO₂ atmospheric content on the corrosion of high power electrical conductors – Part 3. Pure copper**. Corrosion Science, v. 50, p. 1080-1098, 2008.

AOKI, C. S. C. et al. **Desenvolvimento de protótipo para a avaliação de corrosão em cabos de alumínio com alma de aço para o sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica**.-2004.

AOKI, Claudia Souto Cattani et al. **Desenvolvimento de Sistema de Detecção da Corrosão (SDC) em Cabos CAA das Linhas de Distribuição de Energia Elétrica**.

Aoki, C. S. C., Barbosa, C. F., Nallin, F. E., Cesar, P., & Gisolfi, J. B. C. A. **Sistema de detecção de corrosão em cabos de alumínio com alma de aço para linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica**.

SANTOS, N. S.; OLIVEIRA, R. N. P.; BERNAR, R.; NETO, M. F.; QUARESMA, J. M. V.; GARCIA, A. **Efeito do envelhecimento da liga Al-Mg-Si (6101) após laminação a quente na fabricação de cabos elétricos pelo processo de lingotamento contínuo rotativo**. 57º Congresso Anual da ABM - Internacional – São Paulo, 2002.

SANTOS, L. S. **Electrochemical Study of Aluminum Alloys-Silicon in Acid Medium**. 2012. Tese de Doutorado. MSc dissertation.

GONÇALVES, A. L. et al. **UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS NA INVESTIGAÇÃO DA CORROSÃO DO Al E DA LIGA Al-0, 3% Si**. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 14188-14194, 2015.

ZOR, S.; ZEREN, M.; OZKAZANC, H.; KARAKULAK, E. Effect of Cu content on the corrosion of Al-Si eutectic alloys in acidic solutions. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, v. 57, n.4, p.185-191, 2010.

KORI, S.A.; MURTY, B.S.; CHAKRABORTY, M. Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium. **Materials Science and Engineering A**, V. 283, p. 94-104, 2000.

LI, R. X.; LI, R. D.; ZHAO, Y. H.; HE, L. Z.; LI, C. X.; GUAN, H. R.; HU, Z.Q. Age-hardening behavior of cast Al-Si base alloy. **Materials Letters**, v. 58, n.15, p. 2096-2101, 2004

QUADRO, Alexandre Leão et al. **EFEITO DA TEMPERATURA DE SOLUBILIZAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECANICAS DA LIGA 6201**.

DAVIES, G. Aluminium Alloy (6201, 6101A) conductors, **International Conference on Overhead Line Design and Construction: Theory and Practice (up to 150 kV)**, p. 93-97, Nov 1988.

[1] European Aluminium Association, Annual Report 2011 – Activity Report, disponível em www.eaa.net/en/publications/annual-report (acedido em Maio de 2012).

Ferreira, M.G.S.; Fernandes, J.C.S., **Corrosão atmosférica do alumínio**. In Corrosão Atmosférica: Mapas de Portugal, Editores Almeida, E.M.; Ferreira, M.G.S, INETI, Lisboa (1997) 87-98

Ezuber, H.; El-Houd, A.; El-Shawesh, F., **A study on the corrosion behavior of aluminum alloys in seawater**, Materials and Design 29 (2008) 801–805.

[2] European Aluminium Association, disponível em <http://www.alueurope.eu/talat/lectures/5103.pdf> (acedido em Junho de 2012).

SAFRA, Leandro César Pereira Gomes. **Obtenção de fios em ligas de cobre para utilização em linhas de transmissão e em eletrodos para contatos elétricos**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Huaqing, L., Shuisheng, X, Pengyue, W., Xujun, M., Texture of deformed Cu-Cr-Zr alloys – **Journal of University of Science and Technology Beijing**, Mineral, Metallurgy, Material, v. 15, n. 4, p. 434-439, aug. 2008

Saarivirta, M. J., **High Conductivity Copper-Rich Cu-Zr Alloys** –Transactions of the Materials Metallurgical Society of AIME, v. 218, p. 431-437, Jun 1960

MARTINS, M. Falhas catastróficas em transformadores provocadas pelo sulfureto de cobre. Causas e Soluções. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 20, n. 3-4, p. 8-14, 2008.

Manual do Fabricante NEXANS.

STANSBURY, E. E. **Potentiostatic etching**. IN: METALS Handbook 9. ed. Metals Park : ASM, 1985. v. 9: **Metallography and microstructures** p.143-7.

SEDRIKS, A. J. **Effects of alloy composition and microstructure on the pasivity of stainless steels**. *Corrosion* n. 7 v. 42 jul. 1986 p. 376-89.

FONTANA, M.G. **Corrosion Engineering**, Third Edition. Singapore: McGraw-Hill Book Company, 1986.

MAGNABOSCO, R. **Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável** UNS S31803 (SAF 2205). São Paulo, 2001. 181 p.

GENTIL, V. **Corrosão**, 3ed. Rio de Janeiro: LCT Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1996. 373p.

LIBERTO, Rodrigo César Nascimento. *Mestrado EPUSP/PMT, 2004.*