

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).

## **Avaliação eletroquímica da corrosão de materiais metálicos usados em redes de distribuição de água potável**

John Fredy Rios<sup>1</sup>, Jorge A. Calderón<sup>2</sup>

### **Abstract**

The distribution systems of drinking water can be damaged by continuous contact with the liquid and may also affect the water quality, which causes complications in the service. Metals are the most important materials used in drinking water distribution networks. Metal corrosion causes metal dissolution in water, it can cause increases in the concentration of the metal above the rates set by environmental rules. In this study, electrochemical measurements were performed for three metals commonly used in networks systems: carbon steel, 304 stainless steel and copper, in order to assess its performance in the water. Rotating cylinder electrode was used and electrochemical measurements were made at different rotation rates and immersion times. From polarization and electrochemical impedance was found excellent performance of stainless steel and a good performance of copper possibly by forming a passive layer. The performance of stainless steel is favored by the increased of the rotation speed, but copper shows the opposite result. On the other hand, carbon steel shows a low polarization resistance because the formation of a porous film that does not prevent the dissolution of the metal. Additionally, good estimate of corrosion rate of the three materials were obtained from polarization curves.

### **Resumo**

Os sistemas de distribuição de água potável podem ser danificados por contato contínuo com o líquido, isto pode também afetar a qualidade da água, causando complicações no serviço. Os materiais metálicos são de especial importância, porque são os mais utilizados e a sua dissolução na água pode causar aumentos na concentração do metal acima das taxas fixadas por normas sanitárias e de saúde. Neste estudo, medidas eletroquímicas foram conduzidas para avaliar a interação entre água potável e três metais comumente utilizados em sistemas de distribuição: aço carbono, aço inox 304 e cobre. Foram usados cilindros fabricados com os materiais em estudo e montados a modo de cilindro rotativo como eletrodo de trabalho. Com estes eletrodos foram feitas medidas de impedância eletroquímica e curvas de polarização a diferentes velocidades de rotação e tempos de imersão. Os resultados obtidos mostram um desempenho excelente do aço inoxidável e um bom desempenho do cobre, possivelmente pela formação de uma camada passiva. O primeiro é favorecido pelo aumento da velocidade de rotação do eletrodo, mas para o cobre acontece o contrário. Enquanto isso, aço carbono apresenta uma baixa resistência a corrosão, isto pode ser devido à formação de um filme poroso que não impede a dissolução do material. Além disso, uma boa estimativa das taxas de corrosão dos três materiais foi obtida mediante curvas de polarização.

<sup>1</sup> Estudante de doutorado, Engenheiro Químico – Universidade de Antioquia

<sup>2</sup> D. Sc., Engenheiro Metalúrgico – Universidade de Antioquia

**Palavras-chave:** Água potável, Corrosão, Técnicas eletroquímicas, Tubulações metálicas, Cilindro rotatório.

## **Introdução**

---

Nas grandes conglomerações urbanas uma infra-estrutura de rede de tubulação leva a água potável para o consumidor. Aço carbono, cobre, aço inoxidável e outros materiais metálicos, poliméricos e base de cimento são utilizados em sistemas e redes de distribuição que, em contacto com a água, podem se deteriorar. No caso de materiais metálicos a corrosão é causada pelas condições de operação do sistema e características físico-químicas da água. Fatores como a taxa de fluxo de fluido, temperatura, pH, alcalinidade, oxigênio dissolvido e dureza da água e, além disso, os produtos formados na superfície, pode causar a dissolução química do material e, portanto, a perda de metal. Isto, por sua vez, modifica a qualidade da água comprometida no sistema de distribuição. Propriedades da água tais como a cor, sabor e odor podem sofrer mudanças. A promoção de micro-organismos potencialmente nocivos e agentes patogênicos pode também ser facilitada pela corrosão. A corrosão pode também reduzir a carga hidráulica útil e resistência mecânica das tubulações [1].

Dado que a água promove reações que deterioram o material metálico da tubulação e que, por sua vez pode afetar a qualidade da água durante a sua viagem através do sistema de distribuição, é importante estudar a interação da água com diferentes materiais metálicos utilizados em redes distribuição, a fim de determinar a corrosão deles neste meio. Por estas razões, investigações no laboratório são essenciais, mas precisa se conhecer as propriedades físicas e químicas da água potável. Essas propriedades são afetadas por muitos fatores, que dependem da origem da fonte de captação e do tratamento de purificação. Para definir as propriedades da água utilizada no estudo, vários parâmetros foram determinados. No nosso caso, usamos a água fornecida pela empresa que abastece a cidade de Medellín, tomando o líquido da torneira. Esta é caracterizada pela baixa condutividade, baixa concentração de ânions (cloreto, sulfato e nitrato), baixa de sólidos totais, e por ser uma água mole com baixa alcalinidade e pH neutro. Nesta água foi avaliado o comportamento à corrosão do aço carbono, cobre e aço inoxidável (material de referência) utilizados normalmente em sistemas de distribuição secundária de água potável. O principal objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho dos metais nos primeiros dias de imersão em água usando técnicas eletroquímicas, determinando o efeito da velocidade do fluido na deterioração dos materiais de tubulação e comparar o valor da taxa de corrosão estimada pelas medidas eletroquímicas com os valores obtidos em sistemas de tubulação. Para isso, medidas eletroquímicas foram realizadas no potencial de circuito aberto, utilizando as técnicas de polarização e impedância eletroquímica em condições hidrodinâmicas geradas por um eletrodo de cilindro rotativo.

## **Procedimento experimental**

### *Materiais*

Os materiais utilizados no estudo são de cobre eletrolítico, aço carbono ASI / SAE 1020 e aço inox 304. A solução eletroquímica utilizada é água (tomada no Instituto de Investigação da Universidade). Utilizou-se água da torneira para ter condições mais próximas da realidade. Todos os experimentos foram realizados a uma temperatura de  $22 \pm 1$  ° C. Os valores médios

dos parâmetros físico-químicos da água utilizada no estudo são apresentados na Tabela 1. Estes foram determinados através de protocolos descritos no Standard Methods for Examination of Water & Wastewater [2]. É interessante notar que a água contém baixa dureza, um elevado teor de oxigênio dissolvido e cloro residual.

Tabela 1. Parâmetros físico- químicos da água potável usada no estudo.

pH	Condutividade μS/cm	OD mg/L	Cl <sub>res</sub> mg/L	Alcalinidade mg/L	Dureza total mg/L	Cl <sup>-</sup> mg/L	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/L	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L	ST mg/L
7,3	66,3	5,1	0,45	14,1	22,4	5,9	7,1	1,1	62

#### *Ensaio eletroquímico.*

Foram realizadas curvas de polarização potenciodinâmica e de impedância eletroquímica no potencial de circuito aberto, usando uma célula de três eletrodos. Os eletrodos de trabalho foram eletrodos de cilindro rotativo (ECR) de 0,01 m de diâmetro, construídos em aço inox 304, aço carbono e cobre, isolados com Teflon. A área ativa dos eletrodos foi de 3,0 cm<sup>2</sup>. Antes de cada ensaio a superfície do eletrodo de cada material foi preparado como descrito abaixo: polidos com papel abrasivo de SiC grau 600. Seguidamente foram lavados, desengordurados com etanol, lavados com água destilada e secados com ar quente. O eletrodo de referência utilizado foi um eletrodo sulfato saturado, localizado a uma distância adequada da superfície do cilindro, de modo a evitar distorções no potencial. O contra eletrodo foi uma malha de platina da grande superfície (150 cm<sup>2</sup>). Os testes eletroquímicos foram realizados em uma célula eletroquímica com um volume de solução de 0,8 L, que é conectada a um tanque de armazenamento (1,9 L) através de uma mangueira de material inerte (silicone). A água é puxada com uma bomba peristáltica (Marterflex L / S) com baixo fluxo (2 L / h) para evitar alterações de concentração, mudanças no pH e evitar alteração no valor da resistência da solução durante o ensaio. Todos os potenciais são referidos ao eletrodo de sulfato saturado. As medidas eletroquímicas foram conduzidas com um potenciostato Bas Zahner (modelo IMG6e) para todas as medições de polarização e impedância. As curvas de polarização foram realizadas com uma velocidade de varredura de 0,167 mV / s. As curvas foram feitas em um intervalo entre -0,4 e 0,6 V de sobrepotencial a partir do potencial de circuito aberto. Medidas de impedância foram realizadas em potencial de circuito aberto numa faixa de frequência entre 100 kHz - 0.005 Hz, com uma amplitude do sinal de 0,02 V rms.

## **Resultados e discussão**

### **Eletrodo de cilindro rotativo**

O eletrodo de cilindro rotativo é um dispositivo amplamente utilizado para analisar a corrosão na presença de um fluido em movimento, pelas seguintes características marcantes: uma hidrodinâmica turbulenta mesmo em baixas velocidades de rotação, correlações empíricas razoavelmente bem definidas (que relacionam termos como coeficiente de transferência de massa, número de Sherwood, velocidade de fluxo de fluido, número de Reynolds, e propriedades físicas do fluido número de Schmidt), uma distribuição uniforme da corrente elétrica e do potencial, fácil de usar e apresenta a possibilidade de utilizar os resultados para prever os efeitos do fluido em algumas outras geometrias [3]. Existem correlações na geometria do eletrodo de cilindro rotativo para prever o efeito de movimento de fluidos na corrosão de outras geometrias, incluindo a configuração do fluxo numa tubulação. A fórmula que relaciona a velocidade do fluxo numa tubulação com a velocidade de rotação do eletrodo de cilindro rotatório é apresentada na Equação 1.

$$U_{cil} = 0,1185 \left[ \left( \frac{\mu}{\rho} \right)^{-0,25} \left( \frac{d_{cil}^{3/7}}{d_{tub}^{5/28}} \right) Sc^{-0,0857} \right] U_{tub}^{5/4} \quad (1)$$

Onde  $U_{tub}$  e  $U_{cil}$  são as velocidades do cilindro e do fluido na tubulação ( $\text{cm.s}^{-1}$ ),  $\mu$  é a viscosidade absoluta do líquido ( $\text{g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ),  $D_{cil}$  e  $d_{tub}$  são os diâmetros externo do cilindro e interno da tubulação (cm) e  $\rho$  é a densidade do líquido ( $\text{g.cm}^{-3}$ ). Usando a Equação (1) e a expressão  $F$  (rpm) =  $U_{cil} 60 / (\pi D_{cil})$  (onde  $F$  é a velocidade de rotação), pode-se estimar a velocidade de rotação do eletrodo de cilindro rotativo para representar as condições de fluxo na tubulação em estudo. Estes valores são apresentados na Tabela 2 para a água pura. Como exemplo, se a taxa de fluxo de água é de 0,3 m / s em uma tubulação de 1 polegada, o ECR deve ser operado a uma velocidade de 242 rpm para obter condições semelhantes às do tubo. No nosso caso, usamos cinco valores de velocidade que representam as velocidades de fluxo em condições de turbulência que nos permitem determinar se há influência da hidrodinâmica na corrosão dos materiais avaliados.

Tabela 2. Velocidade de rotação do ECR (RPM) correlacionada com a velocidade do fluxo e diâmetro da tubulação de água.

Fluxo (m/s)	Diâmetro da tubulação (Schedule 40)							
	½ pulg. 0,0157 m	1 pulg. 0,0267 m	2 pulg. 0,0525 m	4 pulg. 0,1023 m	6 pulg. 0,1541 m	8 pulg. 0,2027 m	10 pulg. 0,2545 m	12 pulg. 0,3032 m
<b>0,10</b>	67	61	54	48	45	43	41	40
<b>0,30</b>	266	242	215	191	177	169	162	157
<b>0,50</b>	504	459	407	361	335	319	307	297
<b>1,0</b>	1200	1091	967	858	798	760	729	707
<b>1,5</b>	1991	1811	1605	1425	1324	1261	1211	1174
<b>2</b>	2853	2595	2300	2042	1898	1807	1735	1682

Quantidades assumidas para um ECR ( $d_{cil}=0,001$  m,  $A=0,030$   $\text{cm}^2$ ) sendo rotado em água a 25 °C. A densidade da água pura a 25 °C é 997  $\text{Kg/m}^3$  e a viscosidade absoluta é 0,000891  $\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ .

### Curvas de polarização

Como a condutividade do meio estudado é baixa, as curvas de polarização são afetadas pela queda ôhmica. A resistência da solução foi estimada no limite de alta frequência no diagrama de impedância eletroquímica e com ela foi calculada a queda ôhmica para todas as curvas de polarização apresentadas. Antes das medições o ECR foi imerso na água e esperou-se o tempo suficiente para obter um potencial de circuito aberto estável. A influência do transporte de massa foi analisada para os três materiais estudados na água potável, avaliaram-se cinco diferentes velocidades de rotação (100, 225, 400, 625 e 900 rpm). As curvas de polarização para o aço inox 304 são mostradas na Figura 1. Há um aumento da densidade de corrente no ramo catódico conforme aumenta a velocidade de rotação do eletrodo para altas polarizações. Isso pode indicar que o transporte de massa desempenha um papel importante na reação de

redução das espécies sobre o material. Neste caso a espécie que predominantemente na redução é o oxigênio dissolvido, uma vez que os experimentos são realizados em pH neutro e em condições naturais de aeração. Pode ser visto que o potencial de corrosão do aço inoxidável não varia significativamente com o aumento da velocidade de rotação do eletrodo. Assim mesmo as curvas de polarização anódica permanecem inalteradas com a variação da velocidade de rotação do eletrodo. Isso indica que há pouca influência das condições hidrodinâmicas do sistema nas reações de corrosão do aço inoxidável em água potável. Pode-se notar também que há uma região de passivação na curva de polarização, onde a corrente é estável a partir de valores de potencial superiores a 0,01 V para todas as velocidades de rotação de eletrodo.

As curvas de polarização do aço carbono são apresentadas na Figura 2. Neste caso, vemos uma mudança do potencial de corrosão para valores menos negativos com o aumento da velocidade de rotação do eletrodo. Ao observar as componentes anódicas e catódicas pode-se dizer que o metal está em um estado de ativação na faixa de potencial estudada. Não se observa em nenhum caso a passivação do material. De acordo com estes resultados poderia se esperar que a taxa de corrosão do aço carbono aumente com o incremento da velocidade de rotação do eletrodo, o que significa que as condições hidrodinâmicas do sistema influenciam a corrosão do material. A evolução do potencial de corrosão para valores mais positivos com o aumento da velocidade de rotação do eletrodo pode ser devido ao maior crescimento de uma ferrugem não protetora na superfície do metal.

O cobre (Figura 3) não apresenta influência do transporte de massa nos processos de redução ou oxidação com o aumento da velocidade de rotação do eletrodo, posto que não houve variações significativas nos componentes das curvas de polarização catódica e anódica. Também o potencial de corrosão permanece inalterado nas diferentes velocidades de rotação. Semelhante ao que acontece com o aço de carbono, as curvas de polarização do cobre mostram regiões de ativação na faixa de potencial estudada. A curva catódica mostra uma região de corrente limite de difusão na parcela catódica relacionada com a redução de oxigênio dissolvido. Pode ser visto na parcela catódica das curvas de polarização de cobre, que os baixos valores de corrente catódica podem induzir também baixas correntes de corrosão de cobre, como será discutido mais abaixo. Isto contrasta com o proposto por Feng [4], quem afirma que o processo de difusão de íons cobre no filme de óxido em água neutra é quem controla a taxa de corrosão do metal. No nosso caso não há nenhuma influência perceptível de transporte de massa na parcela anódica relacionada com o processo de difusão de íons cobre na película de óxido de cobre formado.

Com as curvas de polarização dos diferentes materiais foi feita uma estimativa da densidade de corrente e da taxa de corrosão. Posto que as parcelas anódicas das curvas de polarização não apresentaram um comportamento típico Tafel, foi necessário calcular as verdadeiras curvas anódicas. Conforme ilustrado na Figura 4, as parcelas anódicas das curvas de polarização foram obtidas a partir da parcela catódica com 50 mV de sobrepotencial por encima do potencial de circuito aberto e usando a expressão  $i_{apl} = i_a - |i_c|$  (onde  $i_{apl}$  é a densidade de corrente aplicada,  $i_a$  é a densidade total de corrente anódica e  $i_c$  é a densidade total de corrente de cátodica, em mA/cm<sup>2</sup>). Uma vez calculada a verdadeira curva anódica foi possível obter coeficiente de Tafel anódico e extrapolar as curvas anódicas e catódicas para determinar a densidade de corrente e potencial de corrosão para cada um dos três materiais testados em cinco velocidades de rotação de eletrodo.

Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram que o potencial de corrosão do aço inoxidável vai ligeiramente para valores mais negativos com o aumento da velocidade de rotação, no entanto, para efeitos práticos da corrosão deste metal pode ser considerada constante. Uma situação similar acontece com o cobre. De maneira diferente ocorre com o aço carbono, apresentando um aumento no potencial de corrosão com o incremento da velocidade de rotação. As densidades de corrente de corrosão dos materiais não apresentam tendências para aumentar ou diminuir com a variação da velocidade de rotação do eletrodo, os valores medidos apresentam valores muito próximos para as diferentes velocidades de rotação. A corrente de corrosão foi significativamente superior para o aço carbono tendo valores próximos a  $12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . As correntes de corrosão do aço inox e do cobre foram nessa ordem muito mais baixas.

Tabela 3. Valores de densidade potencial de corrosão e corrente determinada a partir de curvas de polarização.

Material		Velocidade de rotação (rpm)				
		100	225	400	625	900
Aço inox	$E_{cor}$ (V)	-0,271	-0,272	-0,284	-0,290	-0,291
	$i$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	0,033	0,026	0,031	0,029	0,025
Aço carbono	$E_{cor}$ (V)	-0,947	-0,939	-0,891	-0,818	-0,755
	$i$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	12,00	13,00	12,00	11,00	6,50
Cobre	$E_{cor}$ (V)	-0,315	-0,321	-0,319	-0,321	-0,332
	$i$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	0,72	0,57	0,94	0,84	0,65

$E_{cor}$ : potencial de corrosão,  $i$ : densidade de corrente de corrosão.

Como esperado as correntes de corrosão podem ser ordenados do menor para o mais elevado para os três materiais como segue: aço inoxidável < cobre < aço carbono. Como a corrente de corrosão do aço de carbono 20 vezes maior do que o cobre e cem vezes maior do que o aço inoxidável. No design de tubulações é mais adequado conhecer a taxa de corrosão assumindo uma taxa uniforme de penetração em unidades de comprimento por tempo. Uma estimativa do valor da taxa de corrosão em unidades de  $\mu\text{m} / \text{ano}$ , pode ser feita a partir da densidade de corrente de corrosão [5], utilizando a Equação 2.

$$r = 3,27 \frac{a \cdot I_{cor}}{n \cdot \rho} \quad (2)$$

Onde  $a$  é o peso atômico do material (g),  $I_{cor}$  é a densidade de corrente ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ),  $n$  o número de elétrons transferidos, e  $\rho$  a densidade do material ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). O número de elétrons considerados na determinação da taxa de corrosão foi de 3 para o aço inoxidável, 2 para o aço carbono e 1 para o cobre. Os valores da taxa de corrosão determinados para as diferentes velocidades de rotação são apresentados na Tabela 4 para cada um dos materiais. Os valores foram  $0,2 \mu\text{m} / \text{ano}$  de aço inoxidável, entre 15 e 20 para o cobre, e  $140 \mu\text{m} / \text{ano}$  de aço carbono (exceto para a velocidade de rotação de 900 RPM). Estes valores estão de acordo quando comparados com os valores determinados pelo método de perda de massa de cupons de corrosão dos três materiais num sistema piloto de tubulação para um período de 6 meses [6], que emprega uma velocidade de fluxo de água de  $0,3 \text{ m} / \text{s}$ . Neste trabalho são relatados valores de taxa de corrosão de 0,1; 27; e  $450 \mu\text{m} / \text{ano}$  para o aço inoxidável, cobre e aço carbono, respectivamente, durante um tempo de exposição de 6 meses. As aproximações dos valores da taxa de corrosão calculadas com técnicas eletroquímicas aos obtidos mediante

perda de massa num sistema de tubulação real indicam que o emprego do cilindro rotativo reproduz convenientemente as condições de corrosão dos materiais em situações reais de uso. Deve-se notar que a comparação dos valores da taxa de corrosão é feita com o mesmo acabamento superficial e materiais expostos à água com características semelhantes. Conforme relatado na literatura, os valores estimados de taxa de corrosão mediante curvas de polarização têm que apresentar uma consistência forte com aqueles determinados por perda de massa [7].

Tabela 4. Valores das taxas de corrosão estimada a partir das curvas de polarização.

Material	Velocidad de Rotación (RPM)				
	100	225	400	625	900
<b>Aço inox</b>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Aço carbono</b>	140	150	140	130	76
<b>Cobre</b>	17	13	22	19	15

### *Medidas de impedância eletroquímica*

A fim de avaliar os diferentes processos que podem ocorrer na corrosão de materiais metálicos expostos à água potável, como o crescimento de camadas passivas, adsorção e difusão das espécies, foi feita uma monitoração da impedância eletroquímica no tempo para os materiais em estudo.

Aço inoxidável apresenta alta impedância desde o início da exposição em água potável, como mostrado na Figura 5. O diagrama de impedância de aço inoxidável apresenta um arco capacitivo desde a primeira hora de imersão em água. O tamanho do arco aumenta até o primeiro dia (25 horas). O arco capacitivo apresentado pelo aço inox pode estar relacionado com a formação da camada passiva. Para maiores tempos de imersão não se apresentam aumentos significativos do arco capacitivo. Além disso, houve um aumento da impedância com o aumento da velocidade de rotação, isto pode ser devido ao maior crescimento da camada passiva conforme aumenta a hidrodinâmica do sistema.

No caso do cobre, a impedância é composta por dois arcos capacitivos, que são vistos de forma mais clara após 18 horas de imersão, como mostrado na Figura 6 para a velocidade de rotação de 900 rpm. Com o aumento do tempo de imersão do cobre na água, se apresenta um aumento de impedância, indicando um possível incremento da espessura da película de óxido na superfície e / ou um aumento na resistência a difusão de espécies com tempo de imersão. Feng [4] tem reportado que a espessura do filme de óxido aumenta rapidamente nos primeiros 2 dias e depois mais lentamente até o quinto dia, após o qual a velocidade de crescimento é muito lenta e estável [4]. É concebível que o arco capacitivo a alta frequência esteja relacionado com a dupla camada elétrica e o arco a baixa frequência corresponde aos produtos de corrosão presentes na superfície do eletrodo, o que estaria de acordo com o trabalho de Shim feito em água sintética natural [8]. Shim observou duas constantes de tempo registrados nos primeiros 27 dias de imersão do cobre na água, tempo no qual há um aumento da resistência de transferência de carga e da resistência do filme de óxido. Contudo, tem sido reportado que o arco na região de alta frequência esta relacionado com o processo de difusão de íons cobre no filme de óxido e que o arco a baixa frequência é devido à difusão tipo Nernst de íons cobre desde o filme para a solução [4].

Com o aumento da velocidade de rotação do eletrodo de cobre, há uma diminuição da impedância, após 40 horas de imersão (Figura 7), o que pode indicar que uma maior velocidade de fluido conduz a uma menor espessura de película produtos de corrosão ou uma menor resistência à difusão de íons no filme. Pode se notar que os valores de  $R_p$  diminuem com a redução da velocidade de rotação, mas as frequências características dos arcos capacitivos não variam com o tempo de imersão, indicando que eles são causados pelos mesmos processos. Neste trabalho, a composição do filme de óxido sobre a superfície de cobre não foi determinada, mas é sabido que o filme esta composto principalmente de  $Cu_2O$  e em menor quantidade de  $CuO$  e de  $Cu(OH)_2$  [4,8].

As impedâncias de aço carbono em diferentes tempos de imersão e com velocidade de rotação do eletrodo de 400 e 900 RPM são apresentados na Figura 8. Para ambas as velocidades foi observado que a impedância diminui quando aumenta o tempo de imersão, sendo isto mais notório às maiores velocidades de rotação testadas. Os diagramas de impedância no aço carbono estão compostos por dois arcos capacitivos. O primeiro deles observa-se a altas frequências, relativo a um filme poroso de produtos de corrosão insolúveis [10]. O segundo arco capacitivo bastante achatado, que pode ser dividido a duas contribuições capacitivas, uma associada à dupla camada elétrica em paralelo com a resistência de transferência de carga e a outra associada ao filme de produtos de corrosão compactos formados sobre a superfície do aço. Resultados similares de impedância foram obtidos por Sfair em águas naturais de baixa condutividade [9].

### **Conclusões**

---

- O aço inoxidável tem uma excelente resistência à corrosão na água potável estudada. O aço inox conserva sua passividade devido à alta concentração de oxigênio dissolvido na água, o que favorece a estabilização da camada passiva, que é maior com o aumento da velocidade do fluido.
- A resistência à corrosão do cobre em água potável é boa como foi determinado pelo valor da taxa de corrosão estimada. O processo de corrosão do cobre é caracterizado pela formação dum filme protetor de produtos de corrosão, provavelmente composto por  $Cu_2O$ . A resistência do filme aumenta com o aumento do tempo de exposição, mas diminui conforme aumenta a velocidade do fluido.
- O aço carbono apresenta alta taxa de corrosão em água potável. Isto dado pelas altas densidades de corrente de corrosão e baixa impedância em diferentes condições de velocidade de fluido. Os filmes de produtos de corrosão gerados no aço carbono são porosos y de poucas propriedades protetoras.
- As aproximações dos valores da taxa de corrosão calculadas com técnicas eletroquímicas aos obtidos mediante perda de massa num sistema de tubulação real indicam que o emprego do cilindro rotativo reproduz convenientemente as condições de corrosão dos materiais em situações reais de uso.

### **Agradecimentos**

---

Os autores agradecem à Universidade de Antioquia “Proyecto de sostenibilidad”, e a COLCIENCIAS pelo apoio dado com o programa “Grupo Red de Cooperación en

---

Investigación sobre el Agua – GRECIA; (proyecto GRECIA código: RC-220-2005)”. Adicionalmente pela bolsa de doutorado dada à John Fredy Rios Rojas.

### **Referências bibliográficas**

---

1. L. W. MAYS. *Water distribution systems handbook*. New York. McGraw-Hill. 2000.
2. L. S. CLESCERI, A. E. GREENBERG and A. D. EATON. *Standard Methods for examination of water & wastewater*. Baltimore. United Book Press. 1996. pp. 1368.
3. D. C. SILVERMAN. "The rotating cylinder electrode for examining velocity-sensitive corrosion - A review ". *Corrosion*. Vol 60. N° 11. 2004. pp. 1003-1023.
4. Y. FENG, W. K. TEO, K. S. SIOW, K. L. TAN and A. K. HSIEH. "The corrosion behaviour of copper in neutral tap water. Part I: corrosion mechanisms". *Corrosion Science*. Vol 38. N° 3. 1996. pp. 367-385.
5. R. G. KELLY, J. R. SCULLY, D. W. SHOESMITH and R. G. BUCHHEIT. *Electrochemical techniques in corrosion science and engineering*. New York. Marcel Dekker, Inc. 2003. pp.
6. J. A. CALDERÓN, F. ECHEVERRÍA, J. F. RIOS and E. RAMÍREZ. "Corrosion on drinking water distribution systems and its influence in the water quality". in *17th International Corrosion Congress*. 2008. Las Vegas, Nevada. NACE. pp. 12.
7. Y. FENG, W. K. TEO, K. S. SIOW and A. K. HSIEH. "The corrosion behaviour of copper in neutral tap water. Part II: Determination of corrosion rates". *Corrosion Science*. Vol 38. N° 3. 1996. pp. 387-39.
8. J. J. SHIM and J. G. KIM. "Copper corrosion in potable water distribution systems: influence of copper products on the corrosion behavior". *Materials Letters*. Vol 58. N° 14. 2004. pp. 2002-2006.

9. L. BOUSSELMI, C. FIAUD, B. TRIBOLLET and E. TRIKI. "The characterisation of the coated layer at the interface carbon steel-natural salt water by impedance spectroscopy". *Corrosion Science*. Vol 39. N° 9. 1997. pp. 1711-1724.
10. M. SFAIRA, A. SRHIRI, H. TAKENOUTI, M. MARIE DE FICQUELMONT-LOÏZOS, A. BEN BACHIR and M. KHALAKHIL. "Corrosion of mild steel in low conductive media simulating natural waters". *Journal of Applied electrochemistry*. Vol 31. N° 2001. pp. 537-546.

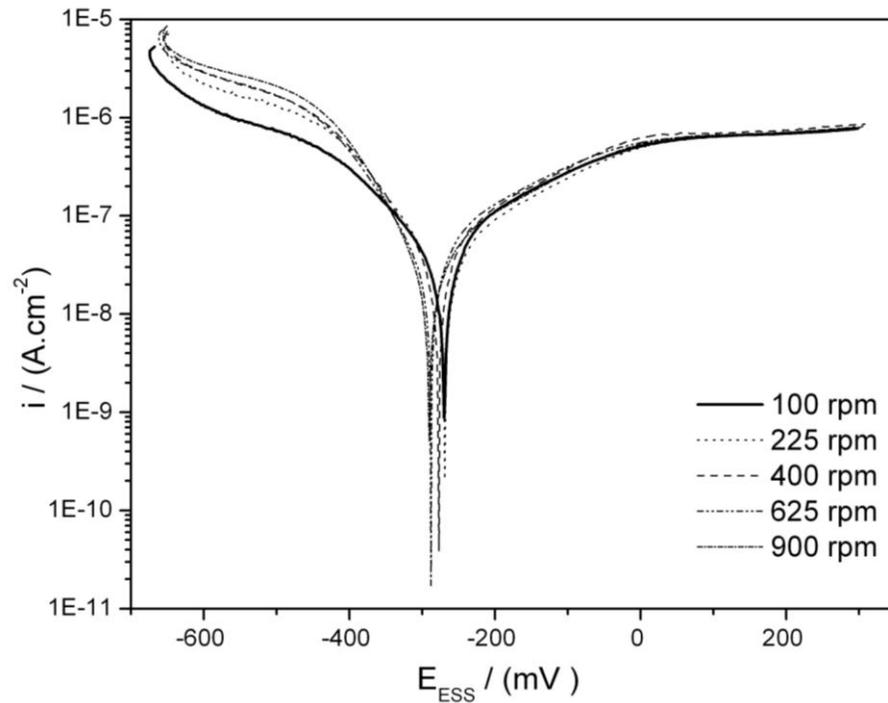


Figura 1. Polarização potenciodinâmica de aço inoxidável 304 a diferentes velocidades de rotação do eletrodo ECR, após 1 hora de imersão em água.

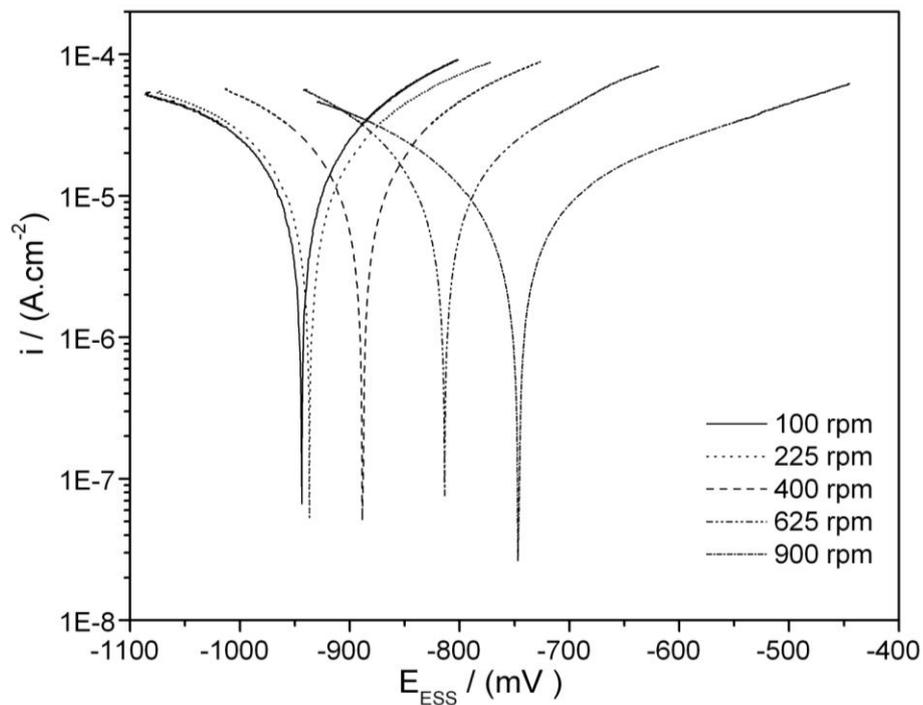


Figura 2. Polarização potenciodinâmica de aço carbono a diferentes velocidades de rotação do eletrodo, após 18 horas de imersão em água potável.

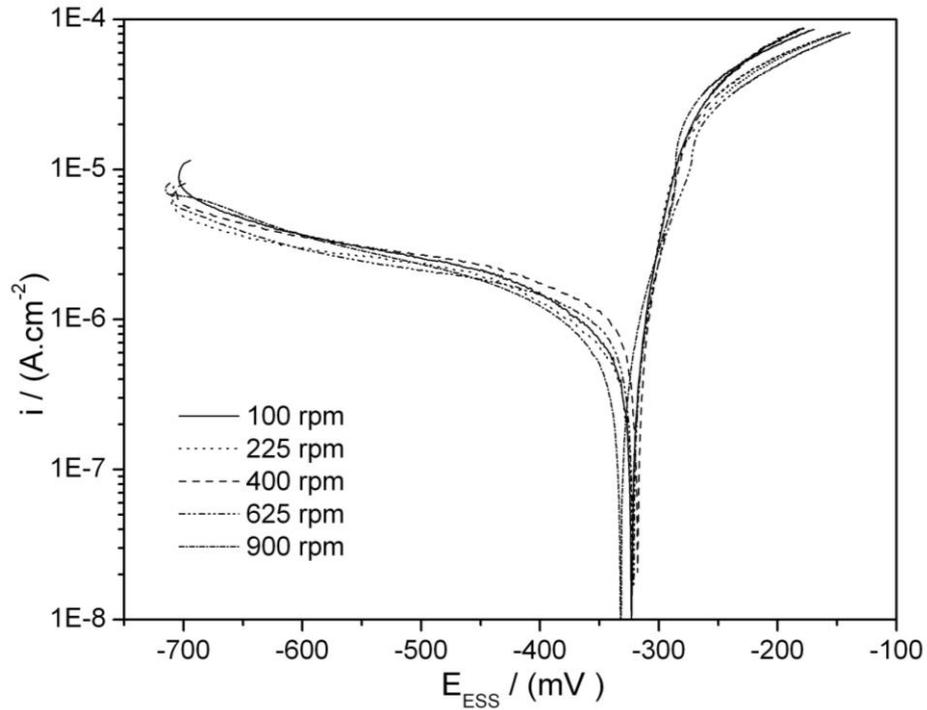


Figura 3. Polarização potenciodinâmica do cobre a diferentes velocidades de rotação do eletrodo, após 1 hora de imersão em água.

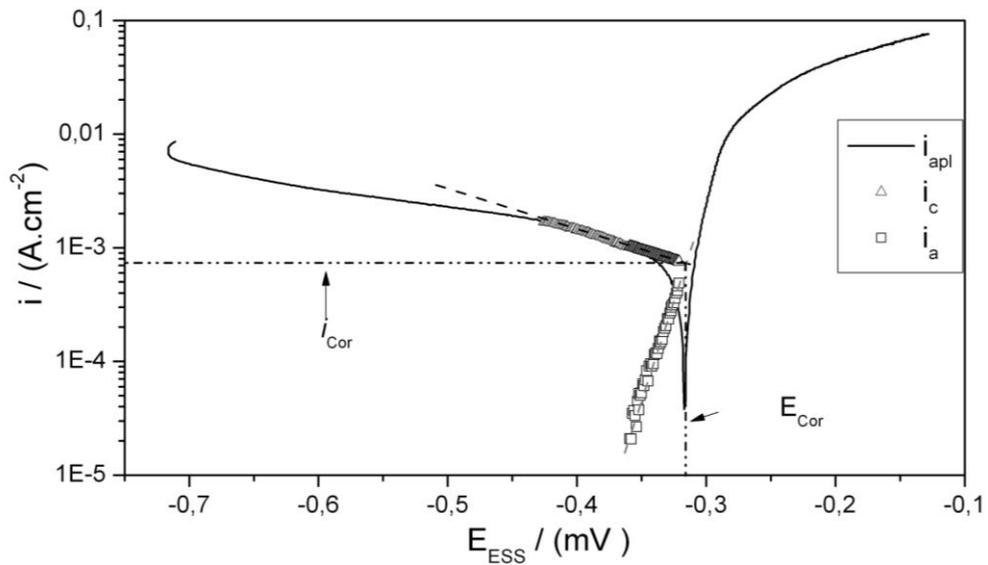


Figura 4. Determinação do potencial de corrosão ( $E_{Cor}$ ) e densidade de corrente de corrosão ( $i_{Cor}$ ).

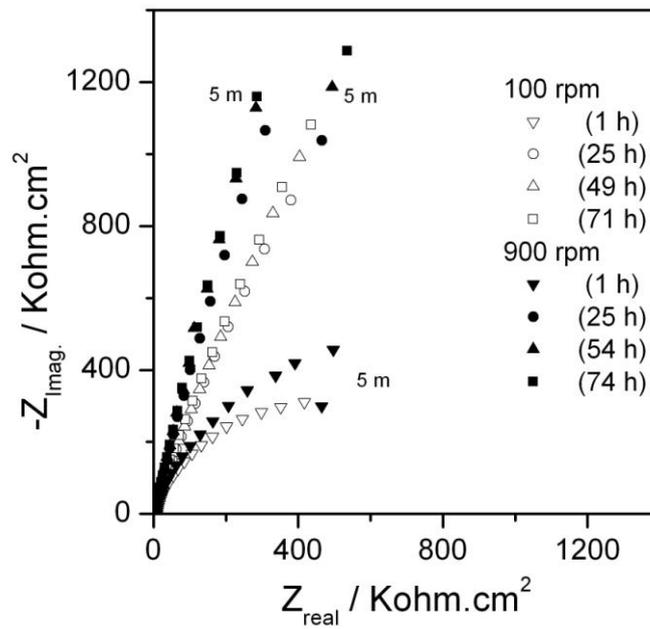


Figura 5. Impedância eletroquímica no PCA do aço inox 304 a diferentes tempos de imersão em água potável. 100 e 900 rpm.

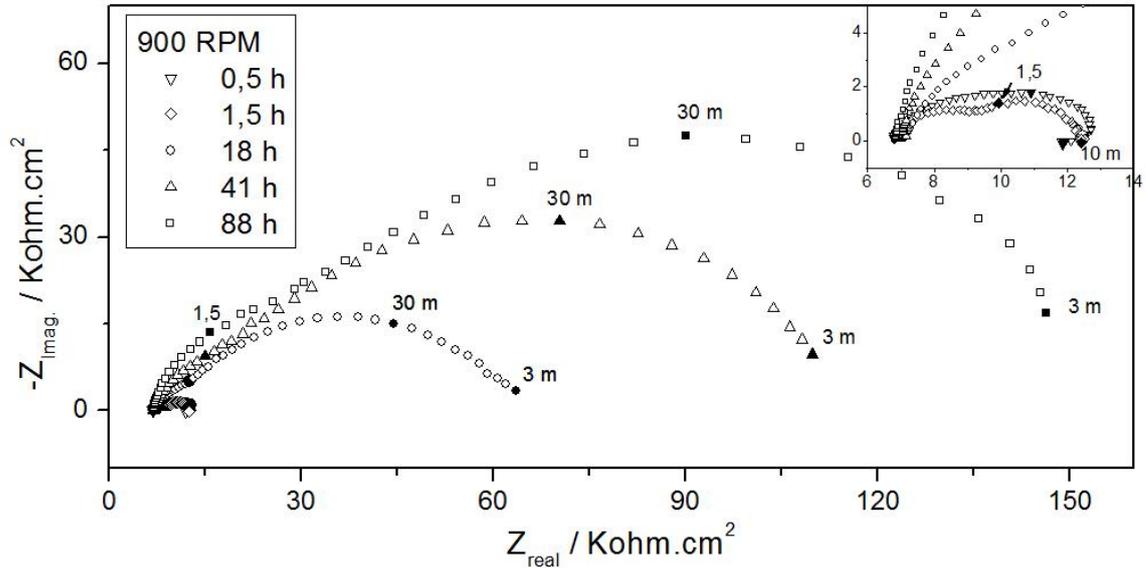


Figura 6. Impedância eletroquímica de cobre a PCA, a 900 rpm, em diferentes tempos de imersão.

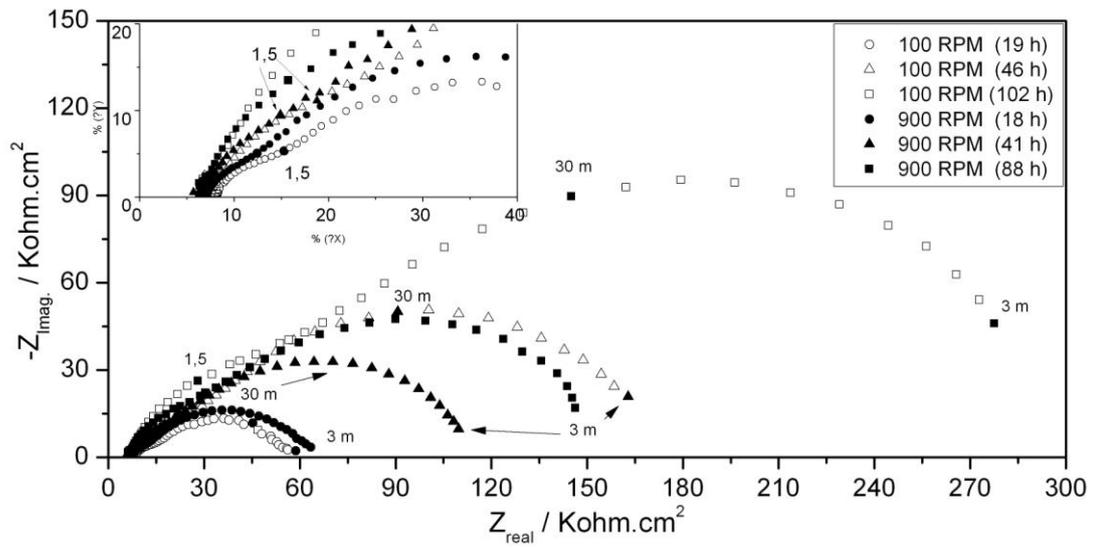


Figura 7. Impedância eletroquímica do cobre a PCA, a 100 e 900 rpm, em diferentes tempos de imersão.

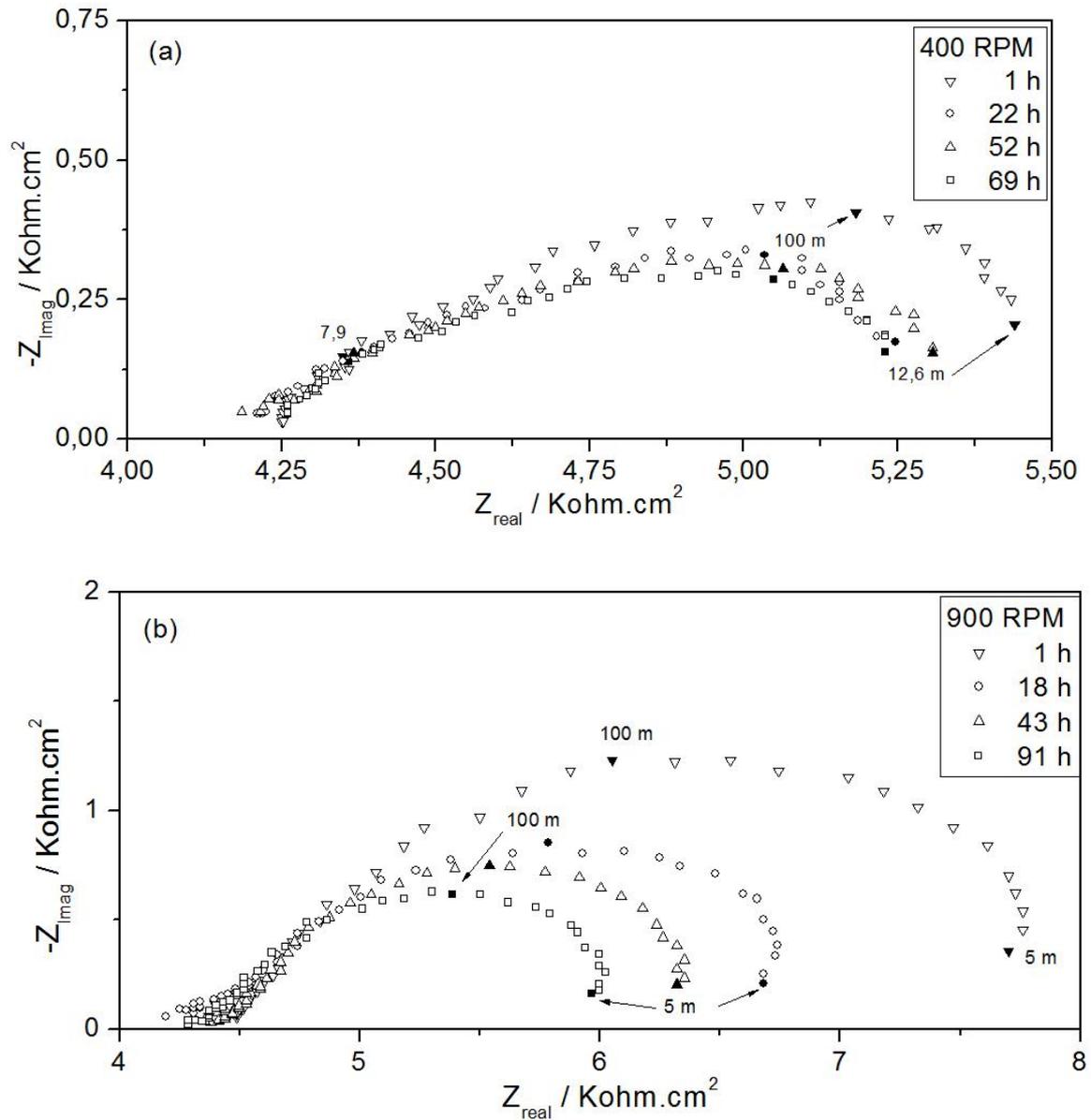


Figura 8. Diagrama de impedância para o aço carbono a PCA em diferentes tempos de imersão. (a) 400 rpm e (b) 900 rpm.