INTERCORR 2008
28° Congresso Brasileiro de Corrosão
2nd International Corrosion Meeting
Mar Hotel, Recife / PE • 12 a 16 de maio de 2008

Estudo comparativo da corrosão do aço-carbono na presença e ausência de microorganismos em diferentes condições de salinidade.

Thiago Rocha dos S. Mathias[1], Mariana Machado Galvão[2], Patrícia Silva Guimarães[1], Eliana Flávia C. Sérvulo[3], Simone L.D.C.Brasil[3]

Abstract

The formation of biofilm and its effect on the corrosion of AISI 1020 carbon steel were investigated in the presence and absence of chloride ion. The experiments were conducted in a dynamic system at room temperature for 28 days. The metallic coupons were exposed to previously sterilized fresh water or seawater, in the presence of a *Pseudomonas* culture, or a mixed culture of *Pseudomonas* and Sulphate-reducing bacteria (SRB), at the initial concentration of 10^8 cells/mL planktonic cells. Likewise, control assays were also maintained carried out under the same experimental conditions without any bacterial inoculation. Weekly, samples were withdrawn to evaluate planktonic and sessile bacteria, the weight loss of metallic coupons, and the corrosion potentials and pH. At the end of the experiments, it was determined the polymer amount in biofilms formed on the metallic surfaces. The colonization of the metallic surface by *Pseudomonas* and the evolution of its growth in the biofilm were similar for both salinities. However, in the presence of SRB, the growth of *Pseudomonas* was greater in seawater. The biopolymer contents in the assays accomplished in fresh water were similar, independently of the microbial population presence. In seawater, the mixed culture biofilms showed higher concentration of polymeric material. The colonization of the metallic surfaces led to inferior weight losses of the metal in comparison to the respective control tests. For the biofilm experiments, the largest losses of the metallic material were evidenced in fresh water in the absence of SRB. The corrosion potential remained practically constant and, through the thermodynamic diagram Eh x pH, was possible to point out the material in the corrosion region.

Keywords: biocorrosion, carbon steel, biofilm, SRB, *Pseudomonas*, biopolymer, fresh water, seawater, weight loss.

[1] Graduação, Engenharia Química – Escola de Química/UFRJ
[2] Mestrado, Escola de Química/UFRJ
[3] Professoras, D.Sc – Escola de Química/UFRJ

Resumo:

Neste trabalho foi estudada a formação de biofilmes e seu efeito sobre a corrosão do aço-carbono AISI 1020 na presença e ausência de íons cloreto. Os experimentos foram realizados em sistema dinâmico e à temperatura ambiente por 28 dias. Os cupons metálicos foram expostos à água doce e água do mar, previamente esterilizadas, na presença de cultura pura de *Pseudomonas*, e de cultura mista de *Pseudomonas* e bactérias redutoras de sulfato (BRS), na concentração inicial de 10^8 células/mL. Para fins comparativos, foi também realizado um ensaio controle, na ausência de microrganismos. Semanalmente, foi realizado o monitoramento das populações de bactérias planctônicas e sésseis, avaliação da perda de massa e taxa de corrosão dos cupons metálicos, dos potenciais de corrosão e pH. Ao final dos experimentos, foi determinada a quantidade de polímero nos biofilmes formados sobre as superfícies metálicas. A colonização da superfície metálica por *Pseudomonas* e a evolução do crescimento no biofilme foi semelhante em ambas as salinidades. Entretanto, na presença de BRS, o crescimento de *Pseudomonas* foi maior em água do mar. O conteúdo de biopolímero nos testes realizados em água doce foi semelhante, independentemente da população microbiana presente. Em água do mar, os biofilmes constituídos da cultura mista apresentaram elevada concentração de material polimérico. A colonização das superfícies metálicas implicou em perdas de massa do metal inferiores aos respectivos experimentos controle nos dois níveis de salinidade. Nos ensaios com biofilmes, as maiores perdas do material metálico foram evidenciadas em água doce na ausência de BRS. O potencial de corrosão se manteve praticamente constante e, através do diagrama termodinâmico Eh x pH, foi possível situar o material nas condições do estudo na região de corrosão.

Palavras-chave: biocorrosão, aço carbono, biofilme, BRS, *Pseudomonas*, biopolímero, água doce, água do mar, perda de massa.

Introdução

O aço-carbono é um dos materiais metálicos mais intensivamente empregados em diferentes segmentos industriais, em especial, na indústria petrolífera. De fato, cerca de 90% das tubulações industriais é ainda hoje de aço carbono; material praticamente insubstituível na construção de oleodutos e gasodutos em razão do seu baixo custo. Contudo, esta liga apresenta baixa resistência à corrosão, principalmente quando em contato com água, resultando na formação de produtos de corrosão volumosos e pouco aderentes, constituídos por uma complexa camada de óxidos e hidróxidos de ferro hidratados [1].

Em geral, as atividades industriais dependem de grandes volumes de água, com uso no resfriamento de produtos, geração de vapor, diluição de insumos, processos de produção, acionamento de máquinas, lavagem em geral, combate e prevenção de incêndio, e como água potável. Na exploração de petróleo, a água é fundamental na "abertura" de um poço e para maximizar a recuperação do óleo. Nestes casos, o recurso hídrico necessário pode provir de água subterrânea, água de superfície, água do mar e água produzida.

O Brasil é detentor de um grande manancial hídrico englobando um vasto sistema fluvial e uma extensa zona costeira, em áreas tropicais e subtropicais do Atlântico Sul. Por isso, sempre que possível, as unidades industriais, sobretudo as que dependem de grandes volumes de água, fazem a sua captação diretamente do mar ou rio, quando localizados nas suas proximidades. A

água salgada é considerada a mais corrosiva em virtude da presença acentuada de sais, sobretudo pela alta concentração de íons cloreto, e indiretamente pela quantidade considerável de ânions sulfatados. A principal diferença entre as águas doce e salgada reside no conteúdo de sais dissolvidos. Mas, distintamente, a composição da água doce é muito variável, em virtude da quantidade e qualidade de sais minerais e substâncias orgânicas que nela se dissolvem à medida que passa por debaixo da terra, sobre a sua superfície, ou mesmo pelo contato com a atmosfera. Ambos os tipos de água podem conter eventualmente ácidos ou bases, resíduos industriais, microrganismos, poluentes diversos e gases dissolvidos, que podem acelerar o mecanismo natural de corrosão do metal [2].

Em ambientes aquáticos, podem coexistir espécies microbianas diferenciadas, com os mais variados tipos de metabolismo. Os microrganismos tendem a aderir a superfícies onde encontra maior disponibilidade de nutrientes e ali se desenvolvem formando biofilmes. Como resultado ocorrem alterações das condições eletroquímicas na interface metal/solução, ocasionando a aceleração ou intensificação do processo corrosivo [3,4]. A colonização das superfícies metálicas pode alterar as condições na interface metal/solução, intensificando o processo corrosivo. Dentre as espécies microbianas, as bactérias redutoras de sulfato (BRS) são tidas como as principais responsáveis pelo processo corrosivo [1,5]. Estas estão presentes nos mais variados nichos ecológicos, devido a sua capacidade de sobreviver em ambientes aerados, e uma vez que se estabeleça a condição de anaerobiose, podem metabolizar diferentes substratos para obtenção de energia [6]. Para tanto, íons sulfato são utilizados como aceptores finais de elétrons com geração de sulfeto, um agente potencialmente corrosivo e tóxico. Por serem microrganismos anaeróbios, a corrosão por BRS ocorre abaixo de tubérculos, sob os quais se formam pites profundos, em função do ataque do metal pelos sulfetos formados durante seu metabolismo [1]. Outras bactérias de possível ocorrência em ambientes aquáticos são as do gênero *Pseudomonas* [7]. Também são associadas a processos corrosivos em virtude da síntese de substancias poliméricas extracelulares (EPS), que favorecem a colonização da superfície de materiais, e a criação de condições anaeróbias necessárias para a atividade das BRS.

O processo corrosivo é responsável por uma série de problemas [1]. Por exemplo, nas instalações das indústrias de petróleo, cerca de 50% das falhas são creditados à corrosão [8]. Como conseqüência, podem ser gerados danos irreparáveis ao meio ambiente, representando custos da ordem de bilhões de dólares. Assim, este trabalho teve como objetivo comparar os processos de corrosão do aço-carbono AISI 1020 pela interação de BRS e *Pseudomonas,* em água doce e água salgada.

Materiais e Métodos

Corpos-de-prova

Foram utilizados cupons retangulares de aço carbono AISI 1020, de diferentes dimensões. Os cupons metálicos utilizados para a determinação da perda de massa apresentavam área de cerca 14 cm^2. A área média dos cupons usados nos ensaios eletroquímicos foi de 1,5 cm^2.

Os cupons para perda de massa foram jateados com areia para a remoção de possíveis incrustações, desengordurados por imersão em acetona, e secos com ar quente. Esses cupons foram mantidos em dessecador até o momento de uso, quando foram pesados ao décimo de miligramas. Para os ensaios eletroquímicos, os cupons foram lixados, e igualmente desengordurados e secos.

Fluidos de Processo

Água Salgada: coletada na praia de Grumari, localizada na zona oeste da cidade do Rio de Janeiro. Esta praia, com aproximadamente 2,5 km de extensão, é parte de uma reserva ambiental, não habitada, o que lhe confere baixos níveis de carga microbiana e poluente, comparável aos índices da água de alto mar, usada em sistemas *offshore.*

Água Doce: coletada próxima à nascente nos arredores da Serra do Mendanha, Rio de Janeiro. Portanto, a água está livre de cloro, e também apresenta baixos níveis de microrganismos e contaminantes.

Ambas as águas foram filtradas através de membrana de éster de celulose de 0,45 μm de porosidade a fim de reter os sólidos em suspensão, e em seguida, foram esterilizadas em autoclave para eliminação dos microrganismos presentes. As águas acondicionadas em frascos estéreis foram mantidas sob refrigeração a 5ºC até o momento de uso.

Culturas Microbianas

Bactérias Redutoras de Sulfato: culturas mistas obtidas a partir de amostras de água do mar e de sistema de resfriamento previamente enriquecidas em BRS através de vários cultivos sucessivos em meio Postgate E modificado [9, 10].

Pseudomonas aeruginosa ATCC 9027: gentilmente cedida pelo Dr Ivano de Fillipis, INCQS/FIOCRUZ, Rio de Janeiro. Esta cultura foi mantida através de repiques mensais, em tubos de ensaio contendo gelose nutriente (DIFCO 0003) inclinada, sob refrigeração a 5°C.

Sistema

Os ensaios foram realizados em cubas de vidro de 1 L de capacidade, dotadas de um eletrodo de referência (Ag/AgCl) e de um contra-eletrodo de aço inoxidável, dispostas sobre placas de agitação a fim de manter o sistema ligeiramente agitado [11]. Inicialmente, a cuba foi desinfetada por imersão em solução de metabissulfito de sódio. A cuba foi então submetida a várias lavagens com água destilada estéril, em fluxo laminar, de modo a garantir a total remoção do desinfetante. A seguir, a cuba foi preenchida com 800 mL do fluido de processo, contendo 50 mL do meio Postgate E modificado [9, 10], isento de agar-agar e sulfato ferroso, e/ou do caldo nutriente, dependendo da cultura microbiana, para garantir a viabilidade das células planctônicas e, consequentemente, a formação de biofilmes no período de ensaio. Após a fixação dos corpos-de-prova, foi feita a inoculação do sistema com um volume de cultivo recente dos microrganismos, a fim de estabelecer uma concentração inicial de 10^8 células/mL. Os experimentos foram conduzidos à temperatura ambiente por um período de 28 dias. Nas condições ensaiadas a concentração de oxigênio dissolvido foi de 13,9±1,9%. Semanalmente, foram feitas análises eletroquímicas (potencial de corrosão), físicas (perda de massa/pH) e microbiológicas (sésseis e planctônicas).

Ensaios Experimentais

Os ensaios foram realizados com a cultura pura de *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 ou cultura mista de *P. aeruginosa* e BRS, tanto em água doce como em água do mar. Para fins comparativos foram conduzidos também ensaios abióticos nas duas condições de salinidade. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

Determinações analíticas

Microrganismos planctônicos e sésseis: Para quantificação das bactérias nos biofilmes formados sobre as superfícies metálicas, os corpos-de-prova foram, logo após serem removidos assepticamente do sistema, tratados conforme anteriormente descrito [12]. A

determinação quantitativa das espécies bacterianas na fase planctônica foi feita a partir de alíquotas diretamente retiradas do meio aquoso.
As BRS foram quantificadas através do método do número mais provável (NMP) [13] no meio Postgate E modificado [9,10], após incubação a 30ºC por 28 dias. A concentração de *Pseudomonas* foi determinada através da contagem de unidades formadoras de colônias (ufc), usando a técnica *pour-plate*, em placas de Petri contendo gelose nutriente (DIFCO 0003) e incubadas a 30°C por 24 h.
Biopolímeros: os biofilmes aderidos às superfícies dos corpos-de-prova foram individualmente raspados em solução tampão e, a seguir, filtrados à vácuo em membrana Millipore, de acordo com Cammarota e Santana [14]. Os materiais retidos nas membranas foram dissolvidos em solução de EDTA-Na, mantidos sob refrigeração a baixa temperatura por 2 h e, então, hidrolisados com solução de fenol e ácido sulfúrico concentrado. As leituras de absorvância das soluções obtidas foram feitas no espectrofotômetro da HACH DR-2000. As concentrações de material polimérico extracelular nos biofilmes foram determinadas a partir de curva de calibração previamente construída com glicose P.A.
pH – através do pHmetro da marca Quimis, modelo Q-400H.
Potencial de corrosão: usando o multímetro digital DM-1000, com eletrodo de Ag/AgCl.
Perda de Massa: os corpos-de-prova, após a raspagem do biofilme de suas superfícies, sofreram decapagem química, conforme procedimento descrito na norma ASTM G1-03 [15], para eliminação dos produtos de corrosão. Os cupons metálicos foram pesados ao décimo de miligrama em balança analítica da marca Gehaka, modelo AG200, e a perda de massa foi determinada pela diferença do peso inicial e final dos corpos-de-prova.
Taxa de corrosão: os dados de perda de massa foram utilizados no cálculo da taxa de corrosão conforme apresentado por Simor e Novais [16].

Resultados e Discussão

As Figuras 1 e 2 apresentam a variação do número de BRS e *Pseudomonas* na fase planctônica e nos biofilmes formados sobre os cupons de aço carbono AISI 1020 em água do mar e em água doce, ao longo de 28 dias. Pode-se observar que o número de microrganismos planctônicos, em geral, aumentou e manteve-se elevado no decorrer do período monitorado, indicando que as condições nutricionais, inicialmente estabelecidas, foram suficientes para garantir a atividade microbiana. A única exceção ocorreu para as BRS em água doce, cuja população não foi mais detectada na fase aquosa no 28º dia de exposição, embora na semana anterior seu número ainda fosse elevado. Tal fato pode ser atribuído à insuficiência de íons sulfato no meio, já que a água doce apresenta teores mínimos de sulfato, distintamente da água do mar. O aporte de sulfato em água doce deve-se principalmente a deposição atmosférica via água da chuva, ou à utilização de fertilizantes que contêm enxofre, como os superfosfatos simples e sais de sulfatos, que dependendo da quantidade empregada e das formas de aplicação e irrigação pode alcançar as águas subterrâneas. De acordo com estudo realizado por Osório Filho *et al*. [17] em Santa Maria, a concentração de sulfato na água da chuva apresenta grande variação ao longo de um ano, variando de 0,1 a 2,6 mg/L, com valor médio anual de 0,9 mg/L. Por outro lado, a água do mar apresenta cerca de 2700 mg/L de sulfato, o que favorece o desenvolvimento das BRS [1].
A colonização dos cupons metálicos foi similar independentemente da salinidade. Com 7 dias já foi possível detectar um número considerável de microrganismos sésseis nas dierentes condições ensaiadas. A cultura pura de *Pseudomonas aeruginosa* apresentou um perfil de

colonização semelhante nas duas condições de salinidade, embora o seu número tenha sido sempre maior nos biofilmes formados sobre os cupons expostos a água doce. Este comportamento pode ser atribuído ao efeito corrosivo dos íons cloreto sobre a liga de ferro-carbono, propiciando a formação de produtos de corrosão volumosos e pouco aderentes, constituídos por uma complexa camada de óxidos e hidróxidos férricos [1]. Deste modo, os microrganismos fixam-se aos produtos de corrosão formados, e não diretamente à superfície metálica sendo, portanto, facilmente removidos pelo fluxo aquoso. Segundo Gentil [1], dentre os fatores causadores de corrosão, a salinidade da água do mar é o de maior influência. O cloreto é o íon de maior efeito no processo corrosivo pela sua ação como eletrólito forte, o que implica na elevação da condutividade da água [18]. Em águas com baixa condutividade, a distância entre anodo e catodo é pequena, o que resulta na formação de produtos de corrosão compactos e aderentes à superfície do metal, representando um efetivo filme protetor. No entanto, em águas salgadas, as regiões anódicas e catódicas se distanciam mais, resultando na formação de depósitos porosos e não aderentes.

Comparativamente, os biofilmes constituídos por ambas as populações de bactérias apresentaram maior número de células de *Pseudomonas* em água do mar, e menor em água doce. Tal fato pode ter sido influenciado pelo crescimento das BRS sésseis, que previsivelmente foi maior em água do mar pela alta disponibilidade de íons sulfato. O metabolismo das BRS, dependendo da espécie, leva a formação de compostos orgânicos [19], que podem ter sido utilizados pela outra espécie, incrementando o seu crescimento.

Na Tabela 1 são apresentadas as concentrações de polímero (EPS) determinadas nos biofilmes formados sobre os cupons de aço carbono após 28 dias de exposição à água do mar e água doce. As quantidades de EPS nos biofilmes constituídos exclusivamente de *Pseudomonas* foram semelhantes, embora a viabilidade dos microrganismos sésseis tenha sido maior em água doce. Nesta condição, a presença de BRS no biofilme também não teve efeito na síntese de EPS. No entanto, os biofilmes constituídos de ambas as espécies de bactérias em água do mar apresentaram uma quantidade de biopolímero 4 vezes maior. Possivelmente, a síntese de EPS foi impulsionada pela agressividade do meio, como conseqüência da presença do sulfeto, o produto resultante do metabolismo das BRS, que neste caso, estavam presentes em número elevado, inclusive maior comparativamente a cultura de *Pseudomonas*. Como pode ser observado na Figura 2, nas duas últimas semanas de exposição, o número de células de *Pseudomonas* na fase séssil manteve-se constante, o que prova que seus gastos energéticos foram destinados à produção do polímero.

As espécies de *Pseudomonas*, em particular *P. aeruginosa* e *P. fluorescens*, são produtoras potenciais de EPS o que favorece a colonização da superfície metálica [7]. Algumas espécies de BRS também são capazes de sintetizar exopolímeros, entretanto, em quantidade muito inferior. Daí, ser atribuída maior importância às bactérias do gênero *Pseudomonas* na produção e secreção de material polimérico. A síntese de EPS pelas células é uma forma de proteção, já que atua como uma barreira protegendo-as do efeito tóxico de compostos químicos, como por exemplo, íons metálicos. A produção microbiana de EPS resulta em aumento da espessura do biofilme [20].

Na Figura 3, estão representados os potenciais de corrosão obtidos ao longo dos ensaios. A análise da Figura permite constatar que os potenciais de corrosão permaneceram numa faixa de pequena variação. De acordo com o diagrama de Pourbaix [21], todos os potenciais obtidos estão situados na zona de corrosão, sugerindo que termodinamicamente a corrosão é possível. Note-se que os potenciais da cultura pura foram semelhantes entre si e aos controles abióticos. Porém, o potencial da cultura mista em água doce foi menos negativo comparativamente ao determinado em água do mar. Este comportamento ocorre normalmente em ambientes mais

reduzidos. A oscilação dos potenciais de corrosão é um indicativo da ocorrência de zonas de corrosão geral e da presença de pites.

A determinação da perda de massa é um método bastante indicado para se avaliar quantitativamente o processo corrosivo e se obter uma medida da extensão do seu ataque [1]. Nas duas condições de salinidade, as maiores perdas de massa dos cupons foram determinadas nos controles abióticos, evidenciando o caráter protetor do biofilme constituído por células e polímero [Figura 4]. Pode-se observar ainda que o controle abiótico conduzido na presença de água do mar foi o que apresentou as maiores perdas de massa nos dias monitorados. Isso pode ser explicado pela ação corrosiva dos íons cloretos, já que todas as condições ensaiadas apresentaram igual teor de oxigênio dissolvido. O biofilme de *Pseudomonas* foi mais efetivo como película protetora em água do mar, embora as quantidades de células e de polímero tenham sido parecidas para os dois tipos de água. Por outro lado, a incorporação de BRS ao biofilme resultou em maior ataque ao metal quando em água do mar. Neste caso, a maior atividade das BRS em função da elevada disponibilidade de sulfato, foi determinante na potencialização do processo corrosivo.

Os valores correspondentes às taxas de corrosão, apresentados na Tabela 2, permitem classificar a corrosividade dos ambientes ensaiados de acordo com a Norma NACE RP-07-75. A presença de biofilmes sem BRS implica em agravamento do processo corrosivo quando em água doce, embora o aumento da taxa de corrosão não seja muito intenso. No entanto, os biofilmes constituídos de microrganismos potencialmente produtores de EPS e BRS são extremamente mais agressivos em água do mar, elevando intensamente o risco de corrosão.

Conclusões

A colonização da superfície de aço carbono é principalmente dependente das características microbiológicas e ambientais do fluido. Tem-se que a atividade de *Pseudomonas* na fase séssil foi mais intensa em água doce em tempos de exposição mais prolongados. No entanto, em água salgada, a degradação do metal foi preponderantemente favorecida pelo metabolismo das BRS, havendo concomitantemente maior produção de biopolímero. Os potenciais de corrosão apresentaram variação do perfil em água do mar em função da atividade microbiana, distintamente do evidenciado em água doce.

Agradecimentos

Este trabalho teve o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências Bibliográficas

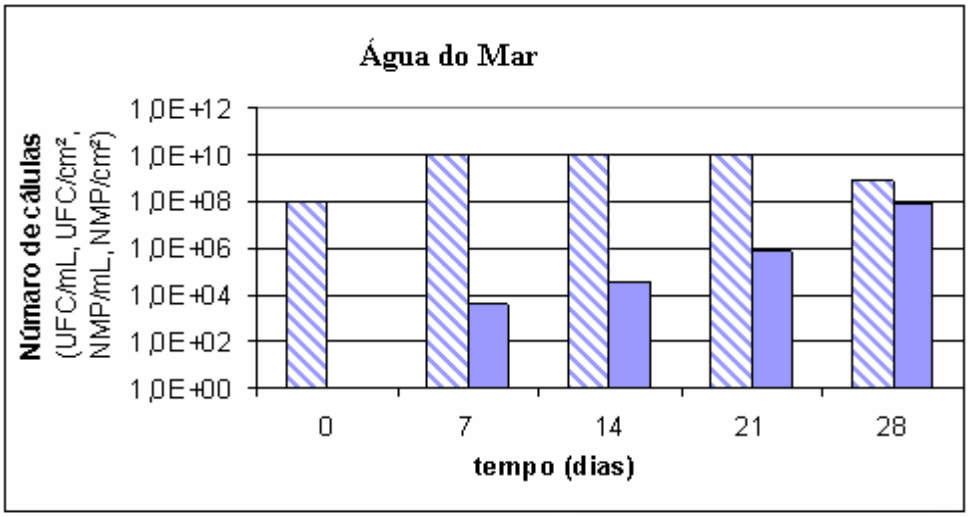
[1] GENTIL, V. **Corrosão.** Livros Técnicos e Científicos Ed. 3ª ed. Rio de Janeiro, 1996. 345p.

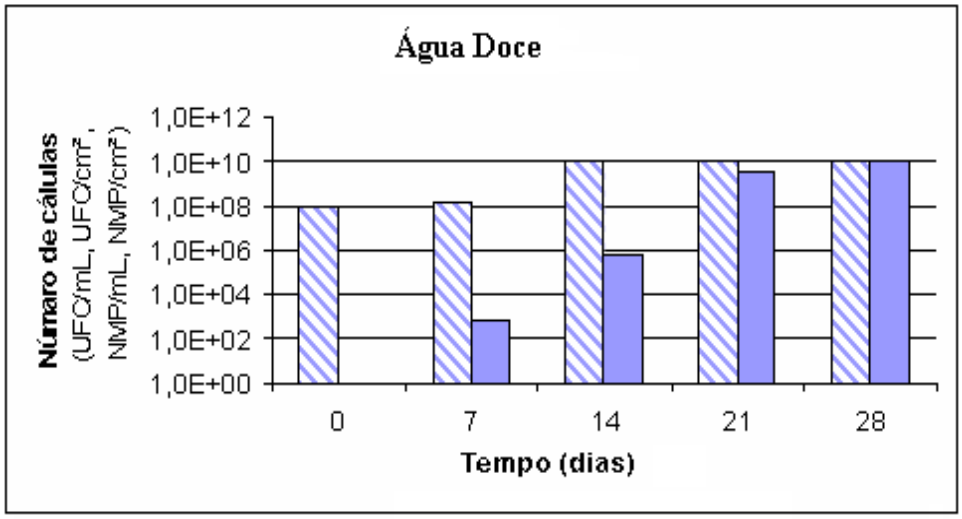
[2] DE FRANÇA, F. P.; LUTTERBACH, M. T. S. Variation in sessile microflora during biofilm formation on AISI-304 stainless steel coupons. **Journal of Industrial Microbiology**, v. 17, p. 711-716, 1996.

[3] NAGIUB, A.; MANSFELD, F. Evaluation of microbiologically influenced corrosion inhibition (MIC) with EIS and ENA. **Electrochimica Acta,** v. 47, p. 2319-2333, 2002.

[4] ORNEK, D.; WOOD, T. K.; HU, C. H.; MANSFELD, F. Corrosion control using regenerative biofilms (CCURB) on brass in different media. **Corrosion Science**, v. 44, p. 2291-2302, 2002.
[5] JACK, R. F.; RINGELBERG, D. B.; WHITE, D. C. Differential corrosion rates of carbon steel by combinations of *Bacillus* sp., *Hafnia alvei* and *Desulfovibrio gigas* established by phospholipid analysis of electrode biofilm. **Corrosion Science**, v. 33, n. 12, p. 1843-1853, 1992.
[6] POTEKHINA, J. S., SHERISHEVA, N. G., POVETKINA, L. P., POSPELOV, A. P., RAKITINA, T. A., WARNECKE, F., GOTTSCHALK, G. Role of microoganisms in corrosion inhibition of metals in aquatic habitats. **Applied Microbiology Biotechnology**, v. 52, n. 5, p. 639-646, 1999.
[7] BEECH, I. B.; GAYLARDE, C. C. Adhesion of *Desulfovibrio desulfuricans* and *Pseudomonas fluorescens* to mild steel surfaces. **Journal of Applied Bacteriology**, v. 67, p. 201-207, 1989.
[8] MAINIER, F. B.; LETA, F. R. O ensino de corrosão e de técnicas anticorrosivas compatíveis com o meio ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA., setembro 2001, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, **Anais** do COBENGE 2001: CD-ROM. Porto Alegre: ABENGE. v. 01, Faculdade de Engenharia**,** Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2001. 6 p.
[9] POSTGATE, J.R. **The sulphate-reducing bacteria**, 2a.ed., Cambridge University Press, England, 1984.
[10] Norma PETROBRAS N-2464 B 1ª Emenda - Meios de cultura e soluções para bactérias redutoras de sulfato. **NORTEC Catálogo de Normas Técnicas da PETROBRAS**, janeiro de 2008. 15 p.
[11] GALVÃO, M. M.; FONSECA, R. R.; BRASIL, S. L. D. C.; SERVULO, E. F. C. Corrosion behavior of AISI 1020 in the presence of biofilms of *Pseudomona*s and SRB using electrochemical techniques. In: 16th International Corrosion Congress, 2005, Beijing, China. **Anais** do 16th International Corrosion Congress, Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005. 8 p.
[12] DE SOUZA, T. A. S.; DE FRANÇA, F. P.; SÉRVULO, E. F. C. Variação dos microrganismos sésseis em função da velocidade de escoamento. In: 7ª CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS e **X**XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, setembro 2003, Florianópolis, Santa Catarina. **Anais** da 7ª COTEQ: CD-ROM. Associação Brasileira de Corrosão, Rio de Janeiro, 2003. 8 p.
[13] OBLINGER, J. L.; KOBURGER, J. A. Understanding and teaching the most probable number technique**. Journal of. Milk and Food Technology**, v. 38, n. 9, p. 540-545, 1975.
[14]CAMMAROTA, M. C.; SANT'ANNA JR, G. L. Metabolic blocking of exopolysaccharides synthesis: effects on microbial adhesion and biofilm accumulation. **Biotechnology Letters**, v. 20, n. 1, p. 1-4, 1998.
[15] ASTM. 2003. **Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens**. ASTM G-1-03. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
[16] SIMOR, E.; NOVAIS, A. P. Gerenciamento da taxa de corrosão por cupons por perda de massa. In: 6ª CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS e XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, agosto 2002, Salvador, Bahia**. Anais** da 6ª COTEQ: CD-ROM. Associação Brasileira de Corrosão, Rio de Janeiro, 2002. 8 p.
[17] OSÓRIO FILHO, B. D.; RHEINHEIMER, D. S.; DA SILVA, L. S.; KAMINSKI, J.; DIAS, G. F. Deposição do enxofre atmosférico no solo pelas precipitações pluviais e respostas

de culturas à adubação sulfatada em sistema plantio direto. **Ciência Rural,** v. 37, n. 3, p. 712-719, 2007. ISSN 0103-8478.
[18] HAMILTON, W. A. Role of sulphate-reducing bactéria in corrosion of mild steel: a review. **Biofouling**, v. 8, p.165-194, 1995.
[19] WIDDEL, F.; PJENNING, N. **Dissimilatory sulfate- or sulfur-reducing bactéria**. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, Krieg, N. R. and Holt, J. G. (ed.), Baltimore, p. 663-679. 1984.
[20] TREVORS J. T.; COTTER C. M. Copper toxicity against *Legionella* and *Pseudomonas.* **International Biodeterioration**, v. 26, p. 139-148, 1990.
[21]DELTOMBE, E.; DE ZOUBOV N.; POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solution**. M. Pourbaix (ed.), Houston, Texas: NACE, 1974. 644 p.





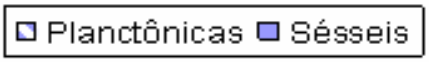


Figura 1: Perfil das populações planctônicas e sésseis da cultura pura de *Pseudomonas* em água doce e água salgada ao longo do tempo de exposição.

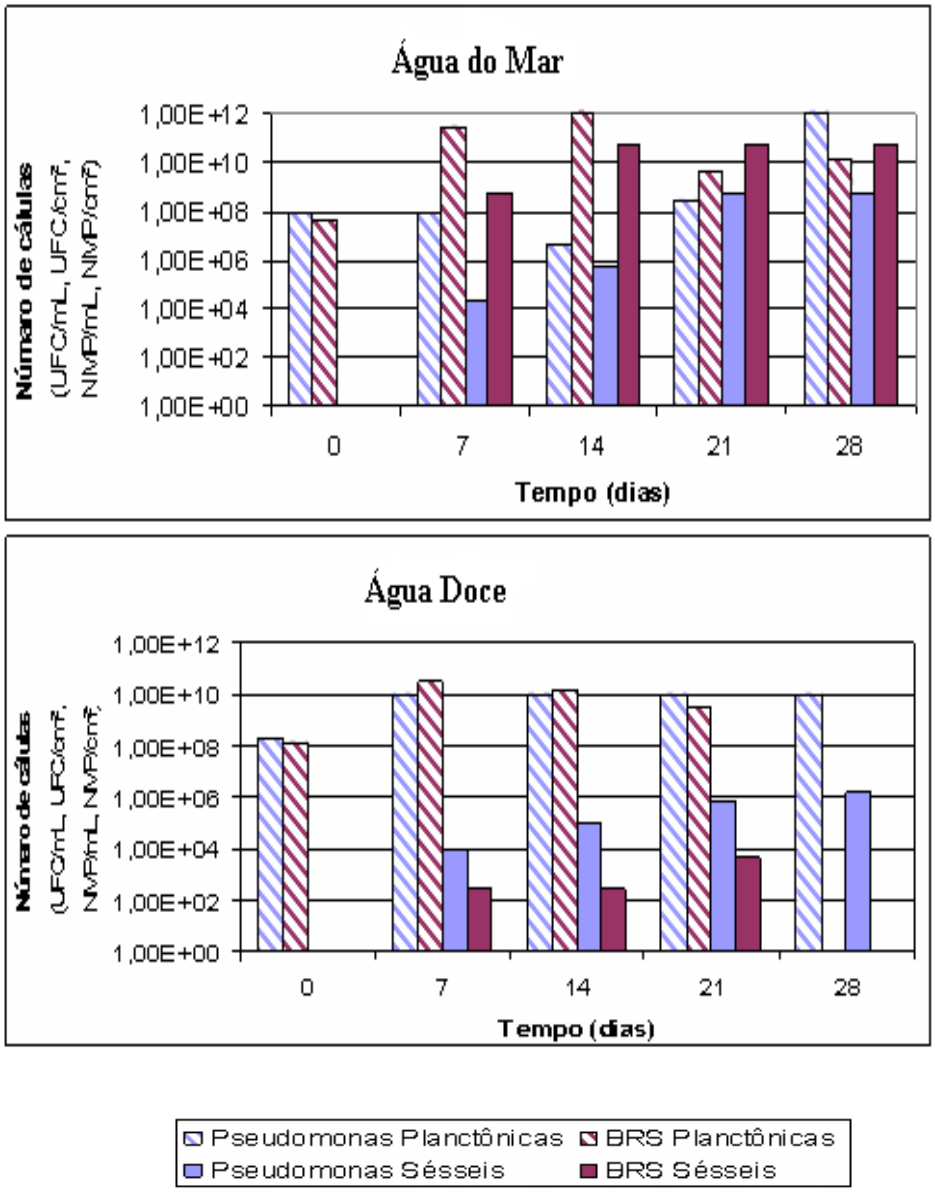
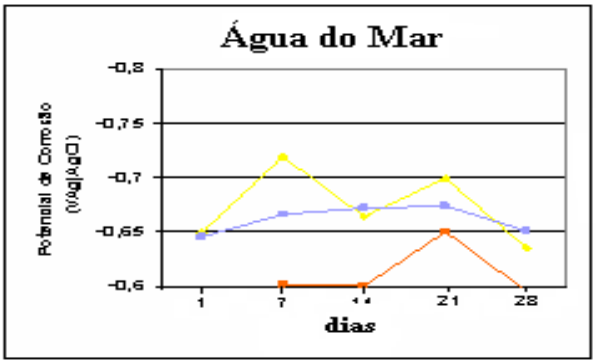
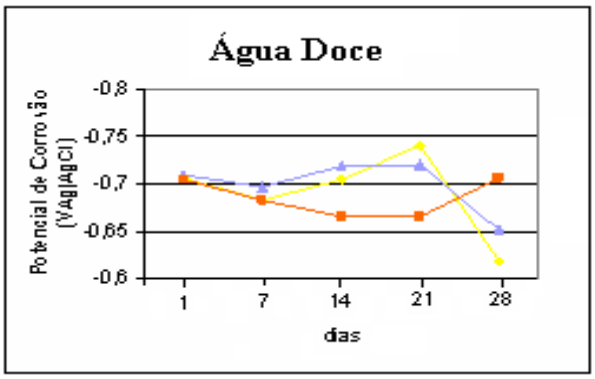


Figura 2: Perfil das populações planctônicas e sésseis de *Pseudomonas* e BRS, em cultura mista, em água doce e em água salgada ao longo do tempo.





Controle abiótico — *Pseudomonas* — Cultura mista

Figura 3: Variação do potencial de corrosão em função dos microrganismos presentes, do ambiente (água doce e água salgada) e do tempo de exposição.

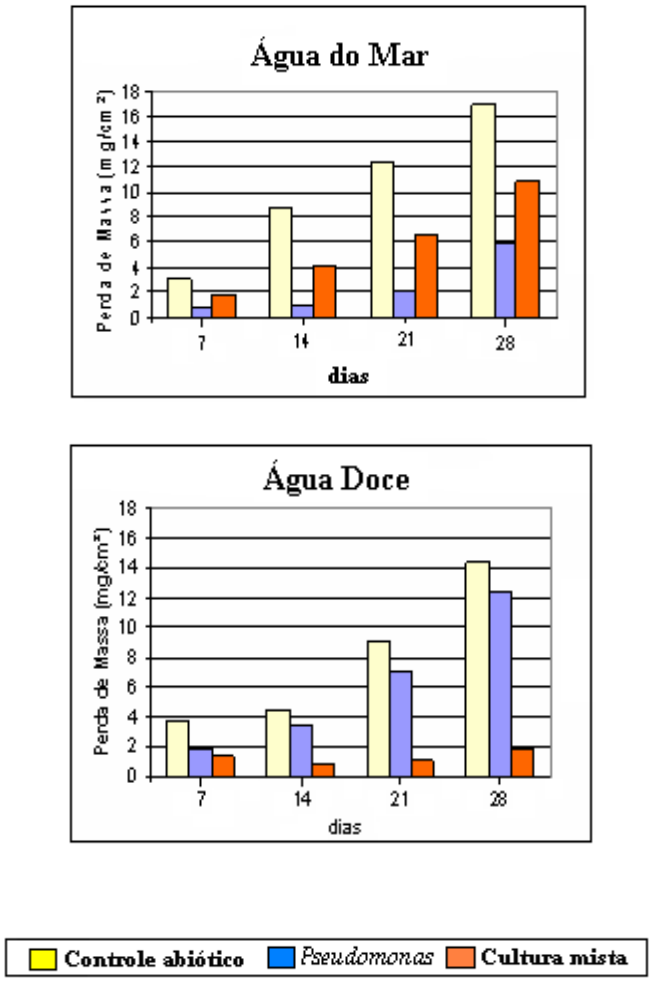


Figura 4: Perda de massa dos cupons metálicos em função dos microrganismos presentes, do ambiente (água doce e água salgada) e do tempo de exposição.

Tabela 1 - Quantidade de polímero presente nos biofilmes formados pela exposição dos cupons metálicos a diferentes sistemas.

Cultura microbiana	**Concentração de biopolímero (mg/L)**	
	Água Doce	**Água do Mar**
Pseudomonas	3,52	2,51
Pseudomonas + BRS	4,11	15,57

Tabela 2 - Taxas de corrosão e respectiva classificação para os cupons de aço carbono AISI expostos a diferentes sistemas.

Cultura microbiana	**Água Doce**		**Água do Mar**	
	Taxa de Corrosão (mm/ano)	Classificação	Taxa de Corrosão (mm/ano)	Classificação
Pseudomonas	0,21	Alta	0,1	Moderada
Pseudomonas + BRS	0,03	Moderada	0,18	Alta