

LEANDRO JORGE DA SILVA

**Corrosão microbiologicamente influenciada em superfícies
metálicas expostas à água de processo industrial de usinas
hidrelétricas**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Microbiologia do Instituto de Ciências Biomédicas da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Microbiologia

Orientador: Prof. Dr. René Peter Schneider

Versão corrigida. A versão original eletrônica encontra-se disponível tanto na Biblioteca do ICB quanto na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (BDTD)

São Paulo
2015

RESUMO

SILVA, L. J. **Corrosão microbiologicamente influenciada em superfícies metálicas expostas à água de processo industrial de usinas hidrelétricas.** 2015. 285 f. Tese (Doutorado em Microbiologia) – Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

A Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo sofre com um acelerado processo corrosivo nas estruturas em contato com a água de processo industrial. O presente trabalho avaliou *in situ* o *biofouling* formado sobre os equipamentos em contato com a água do conduto forçado da usina, bem como a qualidade da água propriamente dita. Em seguida, foram avaliadas as taxas de corrosão e formação de *biofouling* em corpos de prova de aço carbono (SAC 350) e inoxidável (F6NM-X3CrNiMo 13-4) (materiais de referência) expostos à água do conduto forçado da usina, ao reservatório e em pontos remotos situados nos dois principais rios que abastecem o reservatório (Paraguaçu e Jacuípe). Foi também avaliada a resistência à corrosão e formação de *biofouling* em diferentes ligas metálicas, susceptibilidade de revestimentos e soldas expostas à água de processo industrial da usina. Finalmente, foi avaliada a eficiência de filtros lentos de areia no controle da corrosão e formação de *biofouling* em corpos de provas dos materiais de referência expostos à água da Raia Olímpica da USP, com dosagem de diferentes concentrações de cloreto e sulfato. No estudo *in situ*, atividade das bactérias redutora de sulfato, diatomáceas e depósitos de manganês acumulados sobre os equipamentos, principalmente por atividade biótica, podem estar contribuindo para a corrosão de componentes das turbinas e do conduto forçado. Com relação à qualidade da água do conduto forçado, cloreto, carbono orgânico assimilável e sulfato podem ser parâmetros críticos para o processo biocorrosivo. A partir do estudo do reservatório da usina e dos seus principais rios tributários, foi possível prever as taxas de corrosão e as principais características do *biofouling* formado sobre os materiais de referência. Na avaliação dos materiais mais resistentes às características físico-químicas e biológicas da água do conduto forçado da usina, os materiais ASTM A240 304 e 316L (estrutura austenita) apresentaram menores taxas de corrosão, comparados às demais ligas estudadas. Materiais do tipo *Hardcoating* apresentaram susceptibilidade ao desenvolvimento de corrosão e acúmulo de *biofouling* principalmente devido à presença de poros em suas estruturas, que podem propiciar sítios para a adesão microbiana e regiões de aeração diferencial. Dentre os materiais com solda, a 309L mostrou-se mais adequada para suportar as características corrosivas da água do conduto forçado de Pedra do Cavalo. Os filtros contribuíram para redução da quantidade de depósitos acumulados sobre os materiais de referência, em ensaios de dosagem de diferentes concentrações de cloreto e sulfato. Os filtros contribuíram também para redução e aumento das taxas de corrosão do aço inoxidável e carbono, respectivamente. No aço carbono SAC 350 a formação de depósitos menos espessos na água tratada pelos filtros de areia podem ter oferecido uma barreira menos eficiente para a difusão de espécies químicas até a superfície do metal, como o cloreto e o sulfeto de hidrogênio, que aceleram a corrosão desse material.

Palavras-chave: Taxas de Corrosão. Corpos de Prova. Corrosão Microbiológica. *Biofouling*. Biofilmes. Usinas Hidrelétricas.

ABSTRACT

SILVA, L. J. **Biocorrosion on metal surfaces in hydroelectric power plant.** 2015. 285 p. Ph.D. Thesis (Microbiology) – Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

The Pedra do Cavalo hydroelectric plant suffers accelerated corrosion process in the structures in contact with the process water. This study evaluated in situ biofouling formation on the equipment in contact with water from the penstock of the plant as well as the quality of the water itself. Then the corrosion rates and biofouling formation were evaluated in carbon steel (SAC 350) and stainless steel specimens (F6NM-X3CrNiMo 13-4) (reference materials) exposed to water from the penstock of the plant, the reservoir and two mains rivers that feed the reservoir (Paraguaçu and Jacuípe). Also was evaluated the corrosion resistance and biofouling formation in different alloys, coatings and susceptibility of welds exposed to process water plant. Finally, was evaluated the slow sand filter efficiency in corrosion control and the formation of biofouling on reference materials exposed to Raia Olímpica da USP, with dosing of different concentrations of chloride and sulfate. In in-situ study, sulfate reducing bacteria activity, diatoms and manganese deposits accumulated on the equipment may be contributing to the corrosion of the turbine and penstock components. Regarding the water quality of the penstock, chloride, assimilable organic carbon and sulfate can be critical parameters to biocorrosion process. From the study of the plant reservoir and its main tributaries rivers, it was possible to predict corrosion rates and the main biofouling features on the reference materials. In the evaluation of more resistant material to physical-chemical and biological characteristics of water from the penstock plant, ASTM A240 304 and 316L (austenite structure) specimens had lower corrosion rates, compared to the other studied alloys. Hardcoating type materials showed susceptibility to the development of corrosion and biofouling buildup mainly due to the presence of pores in its structure that can provide sites for microbial adhesion and regions of differential aeration. Among the materials with welding, 309L was more suitable to withstand the corrosiveness of the water from the penstock of Pedra do Cavalo. The filters helped to reduce the amount of accumulated deposits on reference materials, into dosage different concentrations of chloride and sulfate test. The filters also contributed to reduction and increase of the stainless and carbon steel corrosion rates, respectively. In SAC 350 materials exposed to water treated by slow sand filters was formed a thinner deposits layer which may have provided a less efficient barrier to the diffusion of chemical species to the metal surface, such as the chloride and hydrogen sulfide, accelerating corrosion of the material.

Keywords: Corrosion Rates. Coupons. Microbial Corrosion. Biofouling. Biofilms. Hydroelectric Power Plants.

Introdução

A corrosão microbiologicamente influenciada em sistemas industriais ocorre principalmente quando a superfície do metal está imersa em água. A elucidação dos mecanismos de biocorrosão atuantes devem considerar a investigação de quatro aspectos básicos: 1) presença de gases (oxigênio, hidrogênio, sulfeto de hidrogênio); 2) características físico-químicas e biológicas do líquido; 3) depósitos de *biofouling* (biofilmes + produtos de corrosão); e 4) substrato metálico (equipamento) (COETSER; CLOETE, 2005).

A maioria dos estudos de corrosão microbiologicamente influenciada é realizada em sistemas *side-stream* e/ou *ex-situ*. Em estudos *side-stream* são realizadas derivações que se unem lateralmente ao sistema monitorado, recebendo a partir deste, uma porção d'água industrial. Nesses estudos, as amostragens são realizadas em locais de fácil acesso e também há a utilização da própria água de processo industrial, com algumas modificações na hidrodinâmica do fluido. Os estudos *ex-situ* são realizados com condições controladas (laboratório) onde geralmente os micro-organismos são inoculados em soluções artificiais e apresentam como principal vantagem, a facilidade de acesso ao local de amostragem (VIDELA, 2003).

No entanto, tanto em estudos de corrosão em sistemas *side-stream* quanto *ex-situ* são realizadas tentativas de reprodução dos parâmetros de operação do sistema, que em muitos casos, podem apresentar distorções significativas com relação ao sistema real e produzir resultados não diretamente relacionados com o fenômeno estudado. Portanto, estudos *in-situ* apresentam como principal vantagem o fato de trabalharem com as condições reais de operação do sistema, não sendo inseridas variáveis adicionais na tentativa de simulação das condições em que o fenômeno estudado tenha ocorrido. A comparação dos resultados obtidos em análises *in-situ* com análises em sistemas *ex-situ* e *side-stream* podem fornecer a confirmação da eficiência desses últimos dois sistemas, na reprodução do ambiente corrosivo (MACUL, 2013; VIDELA, 1996, 2003).

Poucos estudos levantaram dados pertinentes à corrosão microbiologicamente influenciada em sistemas de água de processo industrial diretamente *in-situ* devido às dificuldades na elaboração de cronogramas de coleta de amostras. Nesses casos, a frequência de amostragem depende das condições de operação. Por trabalhar com condições reais de operação, os dados levantados nesse tipo de investigação podem ser importantes para os programas de controle de *biofouling* e da biocorrosão, complementando estudos de outras naturezas, como *ex-situ* ou *side-stream* (DELLEUR, 2006).

A formação de *biofouling* e a corrosão microbiologicamente influenciada são fenômenos complexos onde estão envolvidos processos bióticos e abióticos. O meio abiótico se refere principalmente aspectos metalúrgicos dos equipamentos, natureza do *biofouling* e as propriedades físico-químicas e biológicas do líquido (CLOETE; COETSER, 2005; LITTLE; RAY; LEE, 2011).

O entendimento da natureza do processo biocorrosivo depende, em muitos casos, da caracterização da água de processo industrial, pois a sua composição pode induzir e/ou acelerar a corrosão nos equipamentos metálicos. Os processos de corrosão podem ser influenciados pelas interações das propriedades químicas (pH, presença de íons corrosivos como o cloreto e o sulfato, alcalinidade, oxigênio dissolvido e outros gases, dureza total, condutância específica, potencial de oxirredução, presença de biocidas e outros inibidores naturais de corrosão, etc.) e características físicas (temperatura, sólidos em suspensão, turbidez, vazão, velocidade, etc) de água distribuída (HEALTH CANADA, 2009).

É importante conhecer a natureza do *biofouling* monitorado (depósitos de sedimentação, precipitação ou biofilmes de corrosão). A caracterização química do *biofouling* formado sobre os equipamentos (*in-situ*), nas regiões corroídas e nas áreas adjacentes pode fornecer informações importantes sobre as causas da corrosão. A composição elementar e mineralógica dos produtos de corrosão pode fornecer um *insight* sobre as condições nas quais o processo corrosivo ocorreu. Além disso, o entendimento das vias de conversão mineralógica pode ser uma importante evidência de atividade biótica (VIDELA, 2003).

Dickinson et al. (1997) reportaram a significativa contribuição microbiana na precipitação de óxidos de manganês sobre superfícies metálicas de usinas hidrelétricas, quando comparada à precipitação abiótica. Segundo esses autores, em ambientes naturais, a precipitação biótica do manganês ocorre em uma taxa muito maior que a abiótica (DICKINSON et al., 1997). Óxidos de manganês são responsáveis por inúmeros casos de corrosão microbiologicamente influenciada em superfícies de aço inoxidável de usinas hidrelétricas (LINHARDT, 2015).

O que diferencia a corrosão biótica da abiótica é a presença de micro-organismos. Portanto, identificar a natureza da corrosão e a contribuição bacteriana no processo corrosivo global é a primeira ação na elucidação dos mecanismos de corrosão nos equipamentos industriais (LITTLE; RAY; LEE, 2011).

Estudos do meio biótico relacionados com a formação de *biofouling* e desenvolvimento da biocorrosão incluem a caracterização dos micro-organismos presentes nos substratos. A presença de micro-organismos nos depósitos de corrosão não é suficientemente conclusiva para

a elucidação dos mecanismos de corrosão. No entanto, a confirmação da presença de grupos bacterianos específicos como micro-organismos oxidantes de ferro e manganês, redutores de sulfato e ferro, diatomáceas, etc., pode ser uma informação de grande importância no direcionamento da investigação (LITTLE; LEE; RAY, 2011; VIDELA, 1996).

Conclusões

O tipo de corrosão nas palhetas fixas do distribuidor, caixa espiral e palhetas diretrizes da UHE de Pedra do Cavalo, BA, é possivelmente agravada pela presença de depósitos de manganês provenientes da dissolução da caixa espiral (onde esse elemento pode estar presente na forma de impurezas) ou das águas do reservatório da usina. Nesse último caso, o manganês divalente pode ser proveniente da lixiviação das rochas que compõem a barragem (tipo Enrocamento). Bactérias oxidantes de manganês podem estar contribuindo para a deposição de manganês nesses equipamentos devido à maior significância das vias bióticas na oxidação e precipitação do manganês em águas naturais, comparada às vias abióticas. Foi quantificada concentração de manganês suficientemente elevada na água de processo industrial para suportar o metabolismo das bactérias oxidantes de manganês. Devido ao grande volume d'água que atravessa o conduto forçado, processos de filtração e/ou precipitação química visando a remoção desse elemento são inviáveis devido, principalmente, aos custos gerados na operacionalização desses processos e à formação de grande quantidade de resíduos. Portanto, como alternativas podem ser adotados tratamentos de superfícies como revestimentos que atuem como barreiras eletrônicas ou visando a redução da adesão de depósitos sobre os equipamentos. Deve também ser verificada a eficiência desses revestimentos no controle do *biofouling* e resistência aos efeitos corrosivos do cloreto. O tipo de corrosão acelerada nas placas dos trocadores de calor e nas hélices das turbinas pode estar relacionada com a ação das bactérias redutoras de sulfato, pois foram detectadas concentrações relativamente elevadas de sulfato na água de processo industrial, além do mineral mackinavita nos depósitos de corrosão acumulados sobre esses equipamentos. Nos trocadores de calor, processos de filtração avançados, como osmose reversa, poderiam ser utilizados devido à menor vazão de água demandada por esses equipamentos. Em todos os equipamentos estudados no presente trabalho, íons cloreto dissolvidos na água industrial e diatomáceas presentes no *biofouling* podem estar contribuindo para aceleração da cinética da corrosão. Os íons cloreto provenientes principalmente das águas do rio Paraguaçu podem estar atuando nas regiões anódicas de corrosão, neutralizando as cargas positivas (dos cátions liberados pela dissolução do metal), favorecendo o processo corrosivo. Diatomáceas podem estar produzindo espécies químicas corrosivas, como peróxidos. Além de cloreto, sulfato e manganês, outros parâmetros de qualidade de água que podem ser críticos dos equipamentos da UHE de Pedra do Cavalo são o carbono orgânico assimilável (importante para formação de biofilmes heterotróficos), ferro total e dissolvido. O *biofouling* formado sobre os equipamentos da UHE de Pedra do Cavalo

em contato com a água de processo industrial apresentou composição predominantemente inorgânica, sendo que na fração orgânica, o percentual de proteínas foi, na maioria dos casos, superior ao de açúcares totais. Nesse *biofouling* foram isolados micro-organismos redutores de sulfato e ferro e oxidantes de ferro e manganês. Para controle do *biofouling* e, possivelmente, da corrosão – principalmente quando motivada pela formação de células de aeração diferencial devido à distribuição dos biofilmes na superfície dos equipamentos – nos trocadores de calor (que demanda quantidades relativamente baixas de água) a adoção de tecnologia tratamento de água convencional como filtros lentos de areia poderia fornecer eficiência no controle desses problemas associada à um baixo custo de instalação e operação. Além disso, avaliação *in situ* da resistência à corrosão e formação de *biofouling* de diferentes ligas metálicas poderia ser uma alternativa para a escolha de materiais que irão compor a estrutura dos equipamentos da usina, bem como reposição das peças danificadas. Em estudo com meio de cultivo sintético (simulando a água do conduto forçado da UHE de Pedra do Cavalo, BA), grande parte dos cultivos bióticos apresentaram taxas de corrosão superiores aos controles abióticos indicando que esses grupos microbianos específicos podem estar atuando na corrosão dos equipamentos da usina. Nesses cultivos foi verificado também, na maioria dos casos, maior acúmulo de depósitos de corrosão sobre os corpos de prova de aço carbono e inoxidável nos cultivos das bactérias da corrosão, comparados aos seus respectivos controles (sem bactérias da corrosão).

REFERÊNCIAS*

APHA, AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21th ed. Washington, DC, 1999. 1193 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS (ASTM). **Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens ASTM G1**. West Conshohocken, 2003. 9 p.

ATEKWANA, E. A. et al. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. **Journal of Applied Geophysics**, v. 56, n. 4, p. 281-294, 2004.

BALDOTTO, M. A. et al. Propriedades redox e grupos funcionais de ácidos húmicos isolados de adubos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 31, p. 465-475, 2007.

BENNDORF, D. et al. Functional metaproteome analysis of protein extracts from contaminated soil and groundwater. **The ISME Journal**, v. 1, n. 3, p. 224-234, 2007.

BIOESTAT Rel. Version 5.0. Instituto Mamirauá: Amazônia. Software.

BRADFORD, M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**. v. 72, p. 248-254, 1976.

CANFIELD, D. E.; THAMDRUP, B.; HANSEN, J. W. The anaerobic degradation of organic matter in Danish coastal sediments: iron reduction, manganese reduction, and sulfate reduction. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 57, n. 16, p. 3867-3883, 1993.

COSTA, T. R. **Técnicas analíticas para autópsia de membranas de osmose reversa 2012**, 122 f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) – Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

CROZES, G. F.; CUSHING, R. S. **Evaluating biological regrowth in distribution systems**. American Water Works Association, 2000. 180 p.

DAVISON, W. Iron and manganese in lakes. **Earth-Science Reviews**, v. 34, n. 2, p. 119-163, 1993.

DELLEUR, J. W. **The handbook of groundwater engineering**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1320 p.

DAS, J.; ACHARYA, B. C. Hydrology and assessment of lotic water quality in Cuttack city, India. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 150, n. 1-4, p. 163-175, 2003.

DOOLEY, R. B.; CHEXAL, V. K. Flow-accelerated corrosion of pressure vessels in fossil plants. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 77, n. 2, p. 85-90, 2000.

*De acordo com:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002

DUAN, J.; HOU, B.; YU, Z. Characteristics of sulfide corrosion products on 316L stainless steel surfaces in the presence of sulfate-reducing bacteria. **Materials Science and Engineering: C**, v. 26, n. 4, p. 624-629, 2006.

DUBOIS, M.; GILLES, K.A.; HAMILTON, J. K. Colorimetric method for determination sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, n. 1, p. 350-356, 1956.

ESNAULT, L. et al. Metallic corrosion processes reactivation sustained by iron-reducing bacteria: Implication on long-term stability of protective layers. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 36, p. 1624-1629, 2011.

FLEMMING, H. C.; SZEWZYK, U.; GRIEBE, T. **Biofilms: investigative methods and applications**. CRC Press, 2000.

FILER, S.; JANICK, M. ORP provides versatile water treatment power engineering. **Power Engineering Magazine**. v. 102, n.11, p. 50-6, 1998.

FISCHER, H. et al. Differential retention and utilization of dissolved organic carbon by bacteria in river sediments. **Limnology and Oceanography**, v. 47, n. 6, p. 1702-1711, 2002.

GOULD, W. D. et al. An MPN method for the enumeration of iron-reducing bacteria. In: **Mining and the Environment Conference**. 2003. Disponível em: <<http://pdf.library.laurentian.ca/medb/conf/Sudbury03/Bacteria/57.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2014.

HANDA, B. K. Chemistry of manganese in natural waters. **Chemical Geology**, v. 5, n. 3, p. 161-165, 1970.

HEALTH CANADA. **Guidance on controlling corrosion in drinking water distribution systems**. 2009. Disponível em: <<http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/corrosion/index-eng.php>>. Acesso em: 21 nov. 2014.

HOLDEN, B. et al. The effect of changing inter process and final disinfection reagents on corrosion and biofilm growth in distribution pipes. **Water Science and Technology**, v. 32, n. 8, p. 213-220, 1995.

KALMBACH, S.; MANZ, W.; SZEWZYK, U. Dynamics of biofilm formation in drinking water: phylogenetic affiliation and metabolic potential of single cells assessed by formazan reduction and in situ hybridization. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 22, n. 4, p. 265-279, 1997.

KALYUZHNYAYA, M. G. et al. Fluorescence in situ hybridization-flow cytometry-cell sorting-based method for separation and enrichment of type I and type II methanotroph populations. **Applied and environmental microbiology**, v. 72, n. 6, p. 4293-4301, 2006.

KIELEMOES, J.; VERSTRAETE, W. Influence of copper-alloying of austenitic stainless steel on multi-species biofilm development. **Letters in applied microbiology**, v. 33, n. 2, p. 148-152, 2001.

KISH, J. R. **Active-passive corrosion of iron-chromium-nickel alloys in hot concentrated sulphuric acid solution**. 2009. [PhD Thesis] - McMaster University, Califórnia, EUA, 1999.

LITTLE, B. J.; LEE, J. S.; RAY, R. I. **Diagnosing, Measuring and Monitoring Microbiologically Influenced Corrosion (MIC)**. NAVAL RESEARCH LAB STENNIS DETACHMENT STENNIS SPACE CENTER MS OCEANOGRAPHY DIV, 2011. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a555614.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2015.

MACDONALD, D. J. et al. Using in situ voltammetry as a tool to identify and characterize habitats of iron-oxidizing bacteria: from fresh water wetlands to hydrothermal vent sites. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 16, n. 9, p. 2117-2126, 2014.

MACUL, V. J. **Biocorrosão de Materiais**. 2013, 40 f. Monografia (Graduação em Engenharia Bioquímica) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

MILLS M. S. et al. Organic geochemistry and sources of natural aquatic forms. In: **ACS Symposium Series**. Washington, DC: American Chemical Society, [1974]-, p. 151-193, 1996.

NEWMAN, R. C.; RUMASH, K.; WEBSTER, B. J. The effect of pre-corrosion on the corrosion rate of steel in neutral solutions containing sulphide: relevance to microbially influenced corrosion. **Corrosion science**, v. 33, n. 12, p. 1877-1884, 1992.

OLIVEIRA, F. F. **Avaliação de filtros lentos de areia como pré-tratamento para o controle de biofouling em plantas de osmose reversa aplicadas na dessalinização da água de mar**. 2012, 122 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

PENG, C.Y. et al. Characterization of elemental and structural composition of corrosion scales and deposits formed in drinking water distribution systems. **Water Research**, v. 44, n. 15, p. 4570-4580, 2010.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físico-Químicos**. São Paulo: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. 285 p.

RAY, R.I.; LEE, J.S.; LITTLE, B.J. The anatomy of tubercles on steel, **Nace International Conference & Expo**, Paper nº 11217, 11 p., 2011. Disponível em: <<http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA547604>>. Acesso em: 12 mai. 2013.

SALASI, M. et al. The electrochemical behaviour of environment-friendly inhibitors of silicate and phosphonate in corrosion control of carbon steel in soft water media. **Materials chemistry and physics**, v. 104, n. 1, p. 183-190, 2007.

SARICIMEN, H. et al. Corrosion behaviour of cast iron exposed to Arabian Gulf environment. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, v. 58, n. 6, p. 303-311, 2011.

SARIN, P. et al. Physico-chemical characteristics of corrosion scales in old iron pipes. **Water Research**, v. 35, n. 12, p. 2961-2969, 2001.

SARIN, P. et al. Iron corrosion scales: model for scale growth, iron release, and colored water formation. **Journal of environmental engineering**, v. 130, n. 4, p. 364-373, 2004.

SCHNEIDER, R. P.; SILVA, L. R.; FERREIRA, L. M.; BRANDAO, H. Iron-oxidizing biofilms as possible causes of increased friction coefficient in intermediate and lower guide vane bearing bushings at a hydroelectric powerplant in Brazil. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 58, p. 48-58, 2006.

SHI, X.; AVCI, R.; LEWANDOWSKI, Z. Microbially deposited manganese and iron oxides on passive metals-Their chemistry and consequences for material performance. **Corrosion**, v. 58, n. 9, p. 728-738, 2002.

SLY, L. I.; HODGKINSON, M. C.; ARUNPAIROJANA, V. Deposition of manganese in a drinking water distribution system. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 56, n. 3, p. 628-639, 1990.

STRAUB, K. L. et al. Anaerobic, nitrate-dependent microbial oxidation of ferrous iron. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 62, n. 4, p. 1458-1460, 1996.

TENG, F.; GUAN, Y. T.; ZHU, W. P. Effect of biofilm on cast iron pipe corrosion in drinking water distribution system: corrosion scales characterization and microbial community structure investigation. **Corrosion science**, v. 50, n. 10, p. 2816-2823, 2008.

UHLIG, H. H.; TRIADIS, D. N.; STERN, M. Effect of oxygen, chlorides, and calcium ion on corrosion inhibition of iron by polyphosphates. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 102, n. 2, p. 59-66, 1955.

UROZ, S. et al. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. **Trends in microbiology**, v. 17, n. 8, p. 378-387, 2009.

VAN DER KOOIJ, D.; VAN DER WIELEN, P. W. J. J. **Microbial Growth in Drinking-Water Supplies**. 2014. Disponível em: < http://www.aqua-tools.com/uk/textes/Microbial_Growth_Drinking_water.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2014.

VAN DER KOOIJ, D.; VISSER A.; HIJNEN, W. A. M. Determining the concentration of easily assimilable organic carbon in drinking water. **Journal of American Water Works Association**. v. 74, p. 540-545, 1982.

XU, CONGMIN et al. Localized corrosion behavior of 316L stainless steel in the presence of sulfate-reducing and iron-oxidizing bacteria. **Materials Science and Engineering: A**, v. 443, n. 1, p. 235-241, 2007.

WANG, Q.; TAO, T.; XIN, K. The Relationship between Water Biostability and Initial Bacterial Growth Variations to Different Organic Carbon Concentrations. **Procedia Engineering**, v. 89, p. 160-167, 2014.

WETZEL, R. G. **Limnology: lake and river ecosystems**. Gulf Professional Publishing, 2001.

WINGENDER, J.; FLEMMING, H. C. Contamination potential of drinking water distribution network biofilms. **Water Science & Technology**, v. 49, n. 11, p. 277-286, 2004.

YUAN, H.; XU, C.; ZHU, N. Disinhibition of the ammonium nitrogen in autothermal thermophilic aerobic digestion for sewage sludge by chemical precipitation. **Bioresource technology**, v. 169, p. 686-691, 2014.

ZAKHAROVA T. R.; PARFENOVA V. V. A method for cultivation of microorganisms oxidizing iron and manganese in bottom sediments of Lake Baikal. **Biology Bulletin**, v. 3, p. 290–295, 2007.