

# CORROSÃO EM TUBULAÇÕES DE COBRE UTILIZADAS NO TRANSPORTE DE ÁGUA QUENTE

## *CORROSION IN COPPER PIPES USED FOR TRANSPORTING HOT WATER*

Wagner Sade<sup>1</sup>, Everton Galvão de Neiva<sup>2</sup> e José Roberto Tavares Branco<sup>3</sup>

<sup>1</sup>MSc em Engenharia dos Materiais, Doutorando da Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT (UFOP – CETEC – UEMG). Ouro Preto, MG. E-mail: wagnersade@hotmail.com

<sup>2</sup>MSc em Engenharia dos Materiais – REDEMAT. E-mail: egneiva@gmail.com

<sup>3</sup>PhD, pesquisador pleno da Fundação Centro Tecnológico do Estado de Minas Gerais – CETEC. Belo Horizonte, MG. E-mail: jrtrbranco@yahoo.com.br

### RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo da ocorrência de corrosão em tubos de cobre utilizados nas instalações hidráulicas de coletores solares. As falhas originadas como trincas e degradação acarretaram vazamentos de água e sérios problemas aos usuários. Foram realizadas análises químicas e macroscópicas das amostras como recebidas. Em seguida, procedeu-se ao exame no Microscópio Óptico (MO) e no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A propagação das trincas e os produtos de corrosão também foram investigados. Algumas amostras foram recobertas com Ni químico a fim de se preservar o perfil de trincas.

**Palavras-chave:** coletores solares, tubulações de cobre, trinca, corrosão.

### ABSTRACT

This work presents a study of the corrosion in copper pipes used in the hydraulic installations of solar absorbers. The occurrence of falls like cracking and degradation resulted in leakage of water and damages to users. It was realized the chemical composition and macro analysis of samples as they were received. The samples were examined on Optical Microscope (OM) and on the Scanning Electron Microscope (SEM). It was investigated the propagation of cracking and products from corrosion. Before a micro analysis, some samples were coated with chemical Ni in order to preserve the profile of cracking.

**Keywords:** solar absorbers, copper pipes, cracking, corrosion.

## 1 – INTRODUÇÃO

A utilização dos aquecedores solares no Brasil tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, a taxas de 20% ao ano, bastante superiores às do crescimento da indústria nacional (MESQUITA *et al.*, 2005). A crise energética ocorrida no Brasil em 2001 ampliou ainda mais a atuação deste setor. Novas tecnologias e novos materiais têm sido utilizados na produção de coletores solares tornando-os economicamente mais atrativos. Além disso, trata-se de uma fonte de energia renovável e limpa, sendo uma alternativa ambientalmente sustentável. Por se tratar de tubulações que transportam água quente, uma característica indispensável destes materiais é uma boa resistência à corrosão. Na maior parte dos locais onde estes coletores eram instalados, esta corrosão não era um problema sério, mas, com a expansão do mercado novas regiões do país têm utilizado o aquecimento solar. Isto leva a uma grande diversidade da qualidade da água empregada no sistema, sendo que, em alguns casos, a corrosão passou a ser um problema a ser contornado. Por apresentar boa resistência à corrosão e propriedades mecânicas desejáveis o cobre é altamente utilizado na confecção de tubos para condução de água. Entre as suas propriedades mecânicas destacam-se sua excepcional capacidade de

deformação e ductibilidade o que facilita a extrusão desses tubos.

A corrosão metálica é a transformação de um material metálico ou liga metálica pela sua interação química ou eletroquímica num determinado meio de exposição, processo que resulta na formação de produtos de corrosão e na liberação de energia. Quase sempre, a corrosão metálica (por mecanismo eletroquímico), está associada à exposição do metal num meio no qual existe a presença de moléculas de água, juntamente com o gás oxigênio ou íons de hidrogênio, num meio condutor. A corrosão é um processo químico ou eletroquímico onde ocorre a perda de materiais.

Uma das formas de corrosão que afeta tubulações de cobre é a corrosão sob tensão. Nesta corrosão há a deterioração de materiais devido à ação combinada de tensões residuais ou aplicadas e meios corrosivos. Como se observa a fratura dos materiais, ela é chamada de corrosão sob tensão fraturante (*stress corrosion cracking*). Há uma ação sinérgica da tensão e do meio corrosivo, ocasionando fratura em um tempo mais curto do que a soma das ações isoladas de tensão e corrosão. As tensões residuais que causam corrosão sob tensão são geralmente provenientes de operações de soldagem e deformações a frio como estampagem e dobramento. A corrosão sob tensão fraturante envolve duas etapas: a nucleação da trinca e a propagação da trinca. A

nucleação está associada à formação de *pites* ou discordâncias sucessivas que rompem camadas protetoras, expondo ao ataque, pelo meio corrosivo, regiões ativadas do cristal. A propagação da trinca pode ser intergranular ou intragranular.

Na propagação de trinca intergranular, na corrosão sob tensão, ocorre acompanhando os contornos dos grãos cristalinos, que representam áreas de maior energia, fazendo com que essa região seja corroída, em muitos casos, preferencialmente à matriz. Esse excesso de energia é devido não só à estrutura desordenada dos átomos, mas também ao acúmulo de discordâncias e átomos de impurezas de tal forma que essa região pode ter composição química diferente da média. Na maioria dos casos observa-se, experimentalmente que a penetração de trincas é descontínua. A fratura intragranular resulta numa modalidade de fratura que envolve um mecanismo de corrosão que não ocorre na ausência de tensão. A explicação do problema é particularmente difícil por requerer um mecanismo que permita o aparecimento de trincas em materiais de reconhecida ductilidade. Esse tipo de trinca está associado a fenômenos de natureza eletroquímica, e sua formação e propagação podem ser detidas pela imposição de correntes catódicas (GENTIL, 2003).

O escopo deste trabalho é investigar a corrosão nas tubulações de cobre de um sistema de aquecimento solar de água de prédios e edificações por meio de coletores solares planos. As instalações hidráulicas desses equipamentos, que transportam água quente a 70°C dos reservatórios térmicos para chuveiros, são constituídas de cobre. Esses tubos de cobre que embutidos ou não nas paredes das construções, estão sujeitos à degradação. Decorridos dois anos das instalações dessas tubulações a rede apresentou vazamentos em diferentes locais. A taxa de corrosão é acelerada pelo intemperismo, principalmente por ação de chuva ácida. Além disso, defeitos decorrentes do processo de fabricação dessas tubulações aliados às condições severas de serviços agravam a degradação.

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

O material analisado consistiu de tubos de cobre sem costura, confeccionados por extrusão com 25,4cm de diâmetro interno e 1,0mm de espessura. Foram retiradas 5 amostras ao longo da tubulação desde aquelas expostas ao tempo na junção do aquecedor solar até aquelas com revestimento de poliuretano embutidas na parede imediatamente antes das instalações dos chuveiros elétricos. As amostras com soldas foram retiradas das respectivas juntas que foram unidas para gerar a instalação final: coletor solar – chuveiro. Os cortes das amostras foram feitos axialmente, ao longo da trinca, e radialmente a fim de se observar produtos de corrosão, deformação e trincas. A fim de se evitar que tais cortes gerassem fraturas as amostras foram retiradas fora da zona de concentração de tensões. Apenas os tubos embutidos receberam a lama asfáltica, que foi adicionada de forma residual.

A composição química dos tubos de cobre foi realizada por via úmida em amostras isentas de corrosão e em amostras com corrosão. O teor de enxofre (S) foi analisado por combustão no equipamento Leco visando comparar e se constatar a presença de produtos da corrosão nos resultados. A Figura 1 ilustra a amostragem realizada ao longo das tubulações de cobre. As amostras foram identificadas com os números 1, 2, 3, 4 e 5.

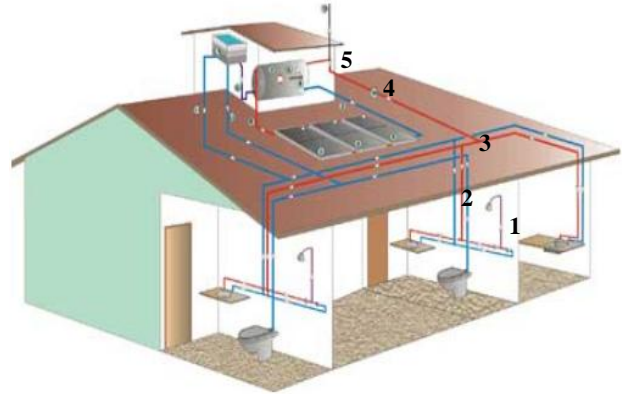


Figura 1 – Amostragem realizada ao longo da tubulação de cobre em questão.

As amostras foram fotografadas por uma câmara digital e posteriormente observadas com auxílio de uma lupa. A fim de se observar produtos de corrosão e trincas localizadas ao longo das amostras, essas foram seccionadas em disco de corte na seção transversal. Posteriormente as amostras foram embutidas em resina termofixa, lixadas com SiC a 240, 400, 600, 800 e 1.500 mesh e polidas com pasta de diamante de granulometrias 3 e 1  $\mu\text{m}$ . Em seguida procedeu-se ao exame no Microscópio Ótico (MO) e no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Algumas amostras em suas seções transversais foram recobertas com Ni Químico para preservação das trincas após polimento. A Figura 2 ilustra a deposição com Ni Químico.

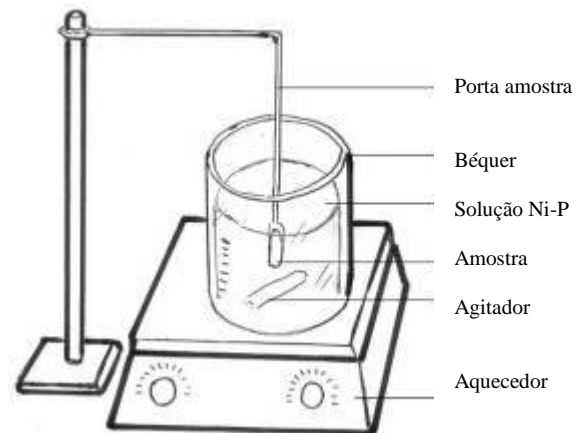


Figura 2 – Diagrama para deposição com níquel químico

A deposição química com níquel é um processo catalítico em meio ácido, sem a necessidade de

utilização da corrente elétrica. Essa deposição é realizada imergindo a amostra em uma solução de sulfato de níquel e hipofosfito de sódio com pH=10 (SADE, 2005). O sulfato de níquel é a fonte de níquel e o hipofosfito de sódio é o agente redutor. As concentrações e as condições de operação utilizada no banho químico para recobrimentos de Ni estão descritas na Tabela 1. Cada reagente tem sua função especificada.

Tabela 1 – Concentrações utilizadas na deposição do filme de Ni (APACHITEI *et al.*, 2002, ASM HANDBOOK, 1994).

CONSTITUINTE OU PARÂMETROS	BANHO QUÍMICO	FUNÇÃO DO CONSTITUINTE
Sulfato de níquel	34g/L	Fonte de níquel
Hipofosfito de sódio	35g/L	Agente redutor
Ácido málico	35g/L	Acelerador
Ácido succínico	10g/L	Acelerador
Ácido láctico	-	Agente complexante
Tioréia	1ppm	Inibidor (estabilizador)
Hidróxido de amônia		Controlador de pH
pH	10	-
Temperatura	85-95°C	-
Taxa de deposição	15µm/h	-

### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Composição Química

A Tabela 2 apresenta a composição química em peso (%p) das tubulações de cobre em questão. O alto teor de cobre, 99,9% sugere que esses tubos tenham sido produzidos com cobre eletrolítico.

O teor de enxofre (S) das amostras com corrosão é de 1,5%, ao passo que nas amostras sem corrosão o teor de enxofre é desprezível. Esse fato constatou a presença de impurezas nas amostras degradadas, principalmente de enxofre.

Tabela 2 – Teores de cobre, ferro e enxofre das tubulações estudadas, % em peso.

Tubos de Cobre	Cu	Fe	S
Sem corrosão	99,90 ± 0,01	< 0,07	< 0,03
Com corrosão	98,00 ± 0,02	< 0,07	1,5

#### 3.2 Análise Macrográfica

Nos exames visuais realizados nas amostras como recebido, a olho nu, foi possível observar a presença de produtos de corrosão esverdeados nos tubos de água quente.

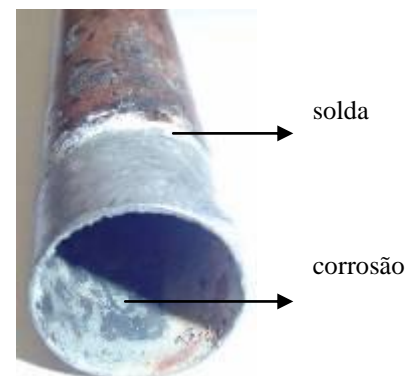
A análise macrográfica da superfície do material investigado evidencia efeitos das condições de trabalho dos tubos de cobre, Figura 3. Verificou-se que ao se retirar da amostra 1, Figura 3(a), um anel próximo do campo à esquerda, um alívio de tensões foi notado pela abertura da trinca ali existente. Além disso, foram

observados produtos de corrosão ao longo das tubulações. Levando-se em conta que essa amostra trata da parte externa dos tubos supõe-se que tenha ocorrido alguma reação química com o material que os envolvia, no caso, o concreto.

A amostra 3, Figura 3(b), mostra além de produtos de corrosão, a interface de soldagem. Observa-se que a interface de soldagem é constituída por outro metal. Esse fato, com certeza, desencadeou a formação da pilha eletrolítica responsável pela corrosão e consequente degradação dos tubos de cobre nesta região. Observa-se nessa amostra que a ocorrência de corrosão é na parte interna e na parte externa dos tubos. Destes produtos de corrosão, destacam-se o cloro e o zinco, provavelmente oriundos do fluxo de solda utilizado no processo de soldagem da tubulação, uma vez que é muito comum a adição de cloreto de zinco e amônia em fluxos de solda. Em relação ao resíduo do fluxo de solda utilizado, a literatura (MYERS e COHEN, 1994) cita que 20% dos casos de falha em tubulação de cobre são causados pelo fluxo de solda. Segundo o autor, uma vez iniciado o processo de corrosão devido ao fluxo de solda (ou ao ingrediente ativo presente no fluxo, no caso, o cloro), a ocorrência dos *pites* é facilitada pela presença de oxigênio dissolvido na água, assim como pela formação de ácido clorídrico dentro do pite (VARGAS *et al.*, 2009, CALLE *et al.*, 2007). Outro aspecto importante abordado pela literatura em relação ao fluxo de solda se refere ao uso em excesso. Quando o instalador da tubulação imerge a ponta do tubo no fluxo de solda, ao invés de pincelar uma fina camada do produto na região da junta, pode-se esperar que o fluxo crie uma trilha de *pites* no sentido do escoamento do resíduo. Neste caso, encontram-se *pites* que estão localizados na periferia do resíduo do fluxo, conforme observado na Figura 3(b).



(a)



(b)

Figura 3 – Amostra 1, trinca que representa a falha e corrosão(a); amostra 3, produtos de corrosão na solda(b).

### 3.3 Análise Micrográfica

A Figura 4 ilustra uma seção tangencial à superfície dos tubos das amostras mostrando produtos de corrosão e trincas representativas da falha. As regiões claras ao longo dessa seção são as impurezas oriundas da corrosão em questão. Essa seção tangencial corresponde a parte externa dos tubos, amostra 4.

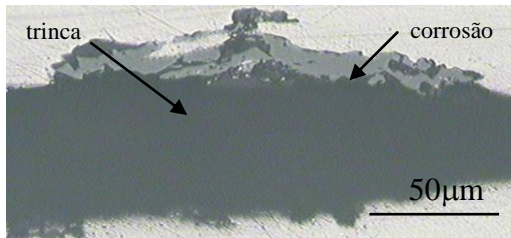


Figura 4 – Seção tangencial à superfície dos tubos com corrosão (regiões claras) e trincas longitudinais, amostra 4.

A seção transversal dos tubos retirada da amostra 5, é mostrada na Figura 5 e destaca a superfície de fratura com grãos alongados em plano longitudinal ao tubo. São aspectos da fratura sem indicadores relevantes de processo dúctil com predominância de fratura intergranular. Notam-se produtos de corrosão com pequena extensão nas áreas claras.

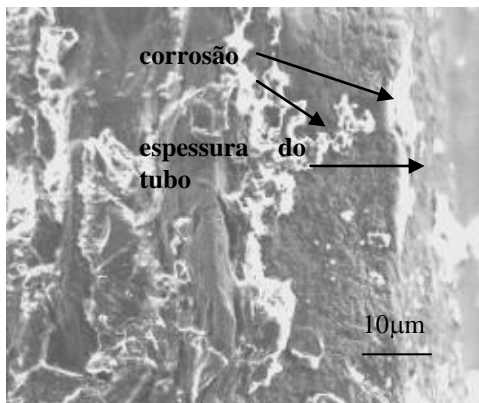


Figura 5 – Superfície de fratura com produtos de corrosão. Amostra 5, imagens ao MEV.

A Figura 6 ilustra um corte na direção da propagação da trinca. A amostra 2 recoberta com Ni químico possibilitou a análise na direção de propagação da trinca. Nota-se a trinca principal que está recoberta com níquel cuja preservação foi o maior interesse e trincas horizontais secundárias ao longo da amostra.

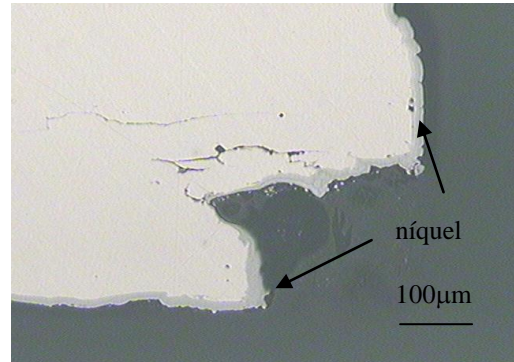


Figura 6 – Corte na direção de propagação da trinca. Amostra 2 recoberta com níquel.

### 3.4 Análise Fratográfica

As trincas identificadas nas amostras seguem da superfície externa dos tubos para seu interior, com a morfologia dendrítica ou ramificada típica de Trincas por Corrosão Sob Tensão – TCST (VAN IKELEN e NUGTEREN, 2005). A coloração esverdeada observada nos produtos de corrosão é uma das características do sulfato de cobre,  $\text{CuSO}_4$ , do hidróxido ou do nitrato de cobre (CHOI *et al.*, 2005, HOFFMAN, 2001, ALFANTAZI *et al.*, 2009). A título de exemplo, pode-se ter a formação de sulfatos, externamente aos tubos, a partir da reação entre cobre (Cu) da tubulação e enxofre (S) presente em argamassas ou proveniente da chuva ácida (TRAN *et al.*, 2003, PASCOALINO *et al.*, 2006). Já os hidróxidos podem ser formar a partir de reações entre o cobre e a água da tubulação, seja interna ou externamente. Nitratos se formariam externamente na presença de compostos ou íons ricos em nitrogênio (ROY *et al.*, 2009). Na literatura encontram-se casos de corrosão sob tensão em tubos de cobre devidos à presença de amônia quando se faz uso de espumas de poliuretano (SAI e ALEX, 2009, SOUZA *et al.*, 2007) ou em situações onde se faça uso de compostos de nitretos para aceleração da cura de argamassas (MORI *et al.*, 2005). O elemento tensão, necessário para a corrosão sob tensão, foi observado. Em termos de tensão mecânica a que esteve sujeita a tubulação, da observação de um anel retirado da amostra 1, Figura 3(a), detectou-se tensão residual tratativa, possivelmente oriunda do processo produtivo dos tubos.

De acordo com as análises micrográficas evidenciaram-se mais uma vez a natureza frágil da fratura. Produtos de corrosão são observados, com pequena extensão. De acordo com a Figura 4 nota-se diversas ramificações ao longo da trinca principal possivelmente, indicativas de corrosão sob tensão, “stress corrosion cracking” (SCC) em materiais de cobre (ROLFE e BARSOM, 1982, FONTANA e GREENE, 1978, CHOI *et al.*, 2007). As trincas oriundas da corrosão sob tensão caracterizam-se, de forma sucinta, por um crescimento lento e gradativo que não pôde ser percebido em decorrência do embutimento dos tubos de



cobre. As evidências macro e micrográficas deste trabalho revelam trincas longitudinais a partir da superfície dos tubos. As superfícies das amostras disponibilizadas para análise estando sujeitas a tensões residuais tratativas, propiciam a nucleação das trincas por corrosão sob tensão.

Enfim, percebe-se da Figura 6, a partir do perfil de trinca, recoberta com Ni Químico, preservada uniformemente pelo recobrimento, que ao longo da trinca principal encontram-se trincas secundárias. Essas trincas podem ser provenientes da extrusão, o processo de fabricação dos tubos, ou de amassamentos quando dos embutimentos desses tubos nas edificações.

O processo de corrosão sob tensão se apresenta então como aquele que racionaliza a falha analisada. As trincas de corrosão sob tensão são reconhecidas como tendo uma componente de corrosão, por vezes tratado como "Falha Atrasada" (FISHER-CRIPPS, 2000, MERKEL e PEHKONEN, 2006) que ocorre quando materiais estão sujeitos a um ambiente agressivo, que pode corroe-lo sob tensões mecânicas, bem inferiores à tensão de escoamento dos materiais. Apesar de ser mais usual a expectativa de que seriam pequenas as evidências de corrosão em superfícies de fratura por corrosão sob tensão isto não significa que elas não existam.

A Figura 7 mostra aspectos da fratura ao longo da amostra 2, sem indicadores relevantes de processo dúctil com predominância de fratura intergranular. A velocidade de penetração de trincas intergranulares, sob ação de tensões é maior em diversas ordens de grandeza do que a penetração por ação puramente química. Observou-se nestas condições que a penetração é descontínua, consistindo em períodos alternados de corrosão e fratura mecânica. Este conceito de corrosão assistida por efeitos mecânicos é suficiente para explicar o processo observado.

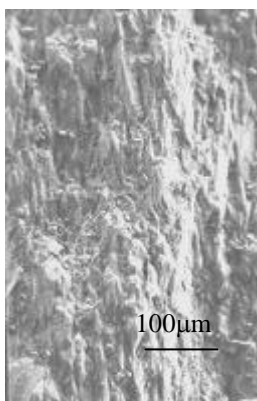


Figura 7 – Fratografia da amostra 2, onde se destacam superfícies intergranulares. Imagens ao MEV.

Os tubos foram impermeabilizados com o frio asfalto que é uma emulsão asfáltica diluída em água, que tem contato apenas residual com os tubos, uma vez que não são aplicados diretamente sobre os mesmos. Esse frio asfalto forma uma camada plástica impermeável e de grande resistência química. Além disso, esses tubos

são envoltos em espuma de poliuretano para isolamento térmico. Entretanto, observam-se resíduos de concreto, provavelmente utilizado para embutimento dessas tubulações, nas amostras 1 e 2, Figura 3. Existe ainda a possibilidade da existência de produtos corrosivos oriundos da argamassa, ou da espuma, que entraram em contato com os tubos devem ser averiguados, casos que indicam serem estas algumas das possibilidades frequentes.

As características da água devem ser observadas. Se a água for capaz de formar produtos de corrosão solúveis, o cobre pode sofrer intensa corrosão. Também se deve destacar a temperatura da água, que nessas tubulações pode atingir 70°C. A água quente acelera o processo de corrosão, pois aumenta a velocidade das reações, o que acarreta a agressividade do meio. As sujidades presentes, provenientes do processo de instalação das tubulações de cobre, tais os resíduos de materiais de construção e o fluxo de solda agem como agentes que impedem a formação da camada protetora anticorrosiva (JACOBS e EDWARDS, 2000, ALLAN e NAZEER, 2009). Além disso, atmosferas em centros urbanos são marcadas pela presença constante de elevados índices de poluição, o que proporciona o aparecimento das chamadas chuvas ácida, responsáveis pela degradação.

A corrosão depende do tempo de exposição dos tubos que como já citado de dois anos exerceu grande influência na degradação dos mesmos. As imagens da Figura 3, já retratada, mostram a perda de massa desses tubos que sob severas condições de serviço aceleraram a corrosão.

#### 4 – CONCLUSÕES

Com base nos casos estudados, exames e análises de laboratórios conclui-se que:

Os produtos de corrosão observados nas tubulações de cobre das instalações hidráulicas dos coletores solares são provenientes da chuva ácida, fluxos de solda ou dos revestimentos aplicados sobre esses tubos.

As trincas analisadas tiveram como principal causa a tensão oriunda principalmente da água ou do processo de fabricação desses tubos.

A ação combinada da corrosão e da tensão sobre essas tubulações aumentou a taxa de degradação e consequentemente diminuiu a vida útil desses materiais.

A falha foi instalada na tubulação de cobre por um processo de fratura por corrosão sob tensão – TCST.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CETEC e seus funcionários pelo apoio neste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

ALFANTAZI, A. M., AHMED T. M., TROMANS, D. Corrosion Behavior of Copper Alloys in Chloride

- Media, **Materials & Design**, v. 30, issue 7, p. 2425-2430, 2009.
- ALLAN, K. N., NAZEER, A. A. "A Review of the Effects of Benzotriazole on the Corrosion of Copper and Copper Alloys in Clean and Polluted Environments", **Journal Application Electrochemical**, v. 39, p. 961-969, 2009.
- APACHITEI, I., TICHELLARR, F. D., DUSZCZYK, J., KAIGERMAN, L. "The Effect of Heat Treatment on the Structure and Abrasive Wear Resistance of Autocatalytic NiP-SiC", **Coatings Surface and Coatings Technology**, Netherlands, 149, p. 263-278, 2002.
- ASM Handbook Committee, **Metals Handbook**, "Electroless Nickel Plating", **Metals Handbook: Surface Engineering**, **American Society for Metals**, v. 5, p. 291, 1994.
- CALLE, G. R., VARGAS, I. T., ALSINA, M. A., PASTÉN, P.A., PIZARRO, G. E. "Enhance Copper Release from Pipes by Alternating Stagnation and Flow Events", **Environmental Science and Technology**, 41(21), p. 7430-7436, 2007.
- CHOI B. H., CHUDNOVSKY, A., SEHANOBISH, K. "Stress Corrosion Cracking in Plastic Pipes: Observation and Modeling", **International Journal Fracture**, 145, p. 81-88, 2007.
- CHOI, B. H., ZHOU, Z. CHUDNOVSKY, A., STIVALA, S. S., SHANOBISH, K., BOSNYAK, C. P. "Fracture Initiation Associated with Chemical Degradation: Observation and Modelling", **International Journal of Solids and Structure**, 42, p. 681-695, 2005.
- FISHER-CRIPPS, "Introduction to Contact Mechanics", ed. Springer, 2000.
- FONTANA, M. G., GREENE, N. D. "Corrosion Engineering", ed. McGraw-Hill, 1978.
- GENTIL, V., "Corrosão", 4. ed., LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro, RJ, cap. 15, 2003.
- HOFFMAN, R. V., "Encyclopedia of Reagents for Organic Synthesis", ed. L. Paquette, New York, 2001.
- JACOBS, S., EDWARDS, M. Sulfide Scale Catalysis of Copper Corrosion", **Water Research**, v. 34, n. 10, p. 2798-2808, 2000.
- MERKEL, T. H. PEHKONEN, S. O. "Generation Corrosion of Copper in Domestic Drinking Water Installations: Scientific Background and Mechanistic Understanding", **Corrosion Engineering Science and Technology**, 41(1), p. 21-37, 2006.
- MESQUITA, L. C. S., MAZZON, L. A. F., TRINDADE, R. C. **Anais do Seminário Cidades Solares**, Belo Horizonte, Brasil, 2005.
- MYERS, J. R., COHEN, A. "Soldering Flux Induced Pitting of Copper Water Lines", **Materials Performance**, USA, v. 33, n. 10, p. 62-63, 1994.
- MORI, G., SCHERER, D., CHEWENTENWEIN, S., WARBICHLER, P. "Intergranular Stress Corrosion Cracking of Copper in Nitrite Solutions", **Corrosion Science**, 47, p. 2005-2124, 2005.
- PASCOALINO, M. P., ALFAYA, A. S., YABE, M. J. S., GIMENEZ, S. M. N. "Incorporação de CuSO<sub>4</sub> Residual em Argamassa, como Método de Disposição Final", Universidade Estadual de Londrina, PR, Brasil, **Química Nova**, v. 29, n. 4, p. 699-703, 2006.
- ROLFE, S. T., BARSOM, J. M. "Fracture and Fatigue control in structures – Applications of Fracture Mechanics", Printice-Hall Inc. and Hall, 1982.
- ROY, S., HEDGE, M. S., MADRAS, G. "Catalysis for NO<sub>x</sub> Abatement", **Applied Energy**, 86, p. 2283-2297, 2009.
- SADE, W. "Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Recobrimentos Químicos de Ni-P", **Dissertação de Mestrado**, Rede Temática em Engenharia de Materiais, Brasil, 2005.
- SAI, S. S., ALEX, J. H. "The effect of Microstruture on the Rate-Dependent Stress-Strain Behavior of Poly(urethane-urea) Elastomers", **Polymer**, v. 50, n. 13, 19, p. 3007-3015, 2009.
- SOUZA, F. V. V., MOTA, R. O., QUINTELA, J. P., VIEIRA, M. M., MARGARIT, I. C. P., MATTOS, O. R. "Characterization of Corrosive Agents in Polyurethane Foams for Thermal Insulation of Pipelines", **Electrochimica Acta**, v. 52, n. 27, p. 7780-7785, 2007.
- TRAN, T. T. M., FIAUD, C., SUTTER, E. M. M., VILLANOVA, A. "The Atmospheric Corrosion of Pipes by Hydrogen Sulphate in Underground Conditions", **Corrosion Science**, 45, p. 2787-2802, 2003.
- VAN IKELLEN, J., NUGTEREN, B. "Intercrystalline Stress Corrosion – A Creeping Threat", **AISTech Proceedings**, v. 1, p. 325-331, 2005.
- VARGAS, I. T., ALSINA, M. A., PASTÉN, P. A., PIZARRO, G. E. "Influence of Solid Corrosion by-Products on the Consumption of Dissolved Oxygen in Copper Pipes", **Corrosion Science**, v. 51, p. 1030-1037, 2009.