

Corrosão em tubos de aço galvanizado de instalações hidráulicas domiciliares

Eng.º Gerson Tajchman (1)

INTRODUÇÃO

A utilização de tubos galvanizados em instalações hidráulicas domiciliares para condução de água é muito difundida no Brasil.

É um material que alia boa resistência mecânica a um custo relativamente baixo. Porém, não raras vezes encontramos com queixas sobre vazamentos de água advindos da corrosão de tais tubos.

Os inconvenientes que se seguem, após eventos deste tipo, são, muitas vezes, os menos desejáveis por qualquer de nós, como, por exemplo, estragos em instalações elétricas, móveis, tapetes etc. Além destes, computam-se os custos para reparos, falta de água antes e durante o período de reparo. Nossa imaginação pode ir mais além, no sentido de prever outros inconvenientes. Há casos, também, que embora a corrosão não provoque vazamentos de água, causa uma diminuição da vazão que a instalação hidráulica normalmente apresentaria, devido à formação de tubérculos ou crosta. Sob tais condições, pode ocorrer, inclusive, o bloqueio completo do fluxo de água.

Os países da Europa, através de suas entidades de proteção ambiental, bem como os Estados Unidos, por intermédio da Agência de Proteção Ambiental (EPA), têm, nos últimos anos, se preocupado com problemas de ordem de saúde no que tange a substâncias que podem ser adquiridas pela água durante seu caminhar, desde a Estação de Tratamento de Água (ou outra fonte) até a torneira do consumidor. Estas substâncias (elementos químicos ou compostos químicos) são naturalmente aquelas que podem causar danos à saúde, seja pelo fato de serem detectadas além de seus limites permitidos nos padrões de potabilidade, ou seja pelo fato de que em hipótese alguma possam estar presentes. Fenômenos como lixiviação de revestimentos de paredes de tubos e reservatórios, formação de compostos

por combinação química entre substâncias de água e tais revestimentos, corrosão metálica, uso indevido de certos materiais, são causas principais da conferência de substâncias indesejáveis à água, quer do ponto de vista quantitativo ou qualitativo.

Tubos de aço galvanizado, de instalações hidráulicas domiciliares, não fogem a este contexto, a partir do momento em que possam estar sendo submetidos a um processo de corrosão internamente. Senão, vejamos. Produtos de corrosão de aço galvanizado podem normalmente conter óxidos e/ou hidróxidos de Zn, Fe, Cd, Pb, e de outros elementos que dependem da composição do revestimento (zinco) do tubo e das características da água em contato. Se não houve um controle da qualidade deste revestimento (galvanização) de acordo com Normas Técnicas próprias, o número de elementos químicos, tanto em qualidade quanto em quantidade, poderá ser tal que comprometerá as características de potabilidade da água conduzida. O período deste comprometimento é um fato importante a ser considerado. Isto, porque, para certos metais, as manifestações de danos à saúde ocorrem por processo acumulativo no organismo humano.

Outros aspectos de importância relevante dizem respeito às características organolépticas da água como gosto, odor, além da cor (6). Tubos de aço galvanizado que estejam submetidos a um processo de corrosão são potencialmente favoráveis em conferir tais repugnantes características à água. Senão, vejamos. Produtos de corrosão de aço como óxidos e hidróxidos, conferem à água uma coloração que varia desde ligeiro alaranjado até um marrom intenso. Embora tais compostos, em suas formas iônicas ou moleculares, não representem, em certas doses, riscos à saúde, a água que os contém é normalmente rejeitada.

O fenômeno da corrosão interna de aço galvanizado, por outro lado, não é atributo único e exclusivo das características deste material. Tem como aliado, de importância fundamental, as características da água

conduzida pelo tubo. O tubo pode estar rigorosamente dentro da mais rígida qualidade desejada, porém, se a água por ele conduzida tiver características de agressividade, cedo ou tarde, a corrosão se manifestará. O mesmo é válido com relação ao fenômeno da corrosão externa de tubos de aço galvanizado. Isto é, o tubo pode estar rigorosamente dentro da mais rígida qualidade desejada, porém, se for instalado em ambiente agressivo, cedo ou tarde a corrosão se manifestará.

Sob o ponto de vista de Engenharia Sanitária, no Brasil, tem sido dada ênfase no sentido de que a água chegue às torneiras do consumidor dentro dos padrões de potabilidade. Um enfoque amplo, na tentativa de caracterizar uma água que possa ser considerada "ideal" é colocada de uma forma que julgamos muito feliz, através da American Water Works Association, o qual transcrevemos a seguir (3):

"A água ideal entregue ao consumidor deve ser clara, isenta de cor, gosto e odor. Não deve conter organismos patogênicos, não deve apresentar formas biológicas prejudiciais à saúde do homem, nem deve ser esteticamente repugnante. Não deve conter concentrações de substâncias ou elementos químicos que possam ser fisiologicamente prejudiciais, esteticamente repugnantes ou economicamente danosos. A água não deve ser corrosiva ou incrustante, bem como não deve propiciar formação de depósitos nas estruturas pelas quais flui ou é retida, incluindo tubos, tanques, aquecedores de água e outros aparelhos hidráulicos".

1 — CONCEITOS BÁSICOS SOBRE CORROSÃO

1.1 — Definição

Entende-se por corrosão o fenômeno da deterioração de um metal por processo químico ou eletroquímico no meio com o qual se encontra em contato.

O ferro encontra-se na natureza sob a forma de compostos como

(1) Gerência da Tecnologia de Materiais e Equipamentos da Cetesb

magnetita (Fe₃O₄), hematita (Fe₂O₃), limonita (Fe₂O₃. nH₂O). O metal ferro é obtido às custas de energia fornecida ao composto (minério) durante o processo metalúrgico.

minério + energia → metal

O átomo possui maior energia livre no reticulado cristalino do metal do que na molécula do minério, estando portanto num estado de equilíbrio instável (14). Sob condições favoráveis do meio em que se encontra o metal, os átomos espontaneamente retornam à situação de menor energia livre, isto é, são capazes de reagir com o meio, formando compostos mais estáveis, conhecidos como produto de corrosão.

meio
metal → produto de corrosão + energia

Nas condições usuais em que as tubulações ficam expostas, o produto de corrosão é constituído basicamente por óxidos, carbonatos e hidróxidos. Compostos não-ferrosos e matéria orgânica existentes no meio podem se juntar ao produto de corrosão.

1.2 — Processos

Os processos principais são os seguintes (12, 14):

- Corrosão química, ou
- Corrosão eletroquímica.

Tais processos podem ser acelerados ou iniciados em associação à ação microbiana (conhecida como corrosão por bactérias). Esforços mecânicos podem, também, levar à corrosão ou acelerar um processo corrosivo.

1.2.1 — Corrosão química

Se caracteriza pela reação química inicial do metal com o meio em que se encontra. O meio pode ser um gás ou um líquido não atuantes como eletrólito (condutores elétricos). A corrosão se desenvolve na superfície de contato entre o metal e o meio atingindo igualmente a toda superfície metálica exposta à ação agressiva do meio.

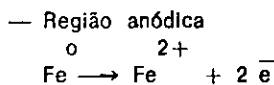
Como exemplo, podemos citar o ataque do ferro com o O₂ do ar atmosférico e, particularmente no caso de caldeiras (lado externo), em contato com o fogo.

1.2.2 — Corrosão eletroquímica

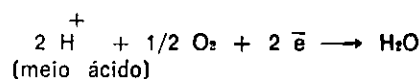
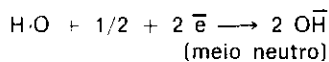
Esta se caracteriza pela ação de um meio condutor (eletrólito) agindo em contato com a superfície de um metal. É aquela que normalmente será referida no presente trabalho.

Neste processo ocorre o aparecimento de regiões anódicas e catódicas na superfície em contato com o meio. Consequentemente, são geradas pilhas eletroquímicas que constituem a base do processo de corrosão eletroquímica.

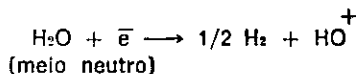
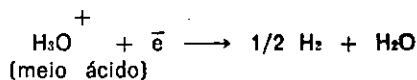
As reações que se processam na corrosão eletroquímica do ferro ou aço são basicamente as seguintes (14):



— Região catódica
a) em presença de O₂



b) em ausência de O₂



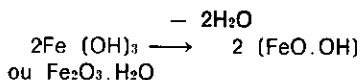
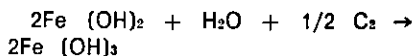
OBS: H₃O equivale a H⁺

Nas reações subsequentes entre as regiões anódicas e catódicas forma-se Fe(OH)₂, o qual sofre transformações de acordo com o teor de O₂ presente no meio, podendo-se obter:

a) Em meio deficiente de O₂



b) Em meio aerado



1.2.3 — Corrosão associada a esforços mecânicos (5)

Quando um metal, além de submetido a ação agressiva do meio, sofre simultaneamente esforços estáticos ou dinâmicos, diz-se que está sujeito à **corrosão sob tensão** (tensões estáticas) ou **corrosão sob fadiga** (tensões cíclicas).

Na corrosão sob tensão, as tensões de tração são as mais prejudiciais ao metal.

Outro tipo de corrosão associada a esforços mecânicos é a denominada **corrosão por erosão**. É bastante comum em superfícies em contato com líquidos em altas velocidades. Trata-se de uma aceleração de um processo corrosivo através do impacto, na superfície metálica, de partículas presentes em suspensão no líquido.

Corrosão por cavitação e corrosão por atrito são também associadas a esforços mecânicos, porém de pouco significado para o presente trabalho.

1.2.4 — Corrosão associada à ação microbiológica (14)

Sob condições propícias do meio (pH, temperatura, nutrientes etc.) podem-se desenvolver certos tipos de microorganismos que, devido a seus processos metabólicos, retiram e/ou lançam no meio, elementos químicos e/ou substâncias que propiciam o início, ou mesmo, aceleram um processo corrosivo em desenvolvimento. Por exemplo, temos as ferrobactérias, as quais têm a capacidade de precipitar Fe²⁺ do meio, sob a forma de hidrato férrico na superfície metálica, e, conseqüentemente, alterar as características do meio.

1.3 — Aparência

Três tipos podem ser diferenciados de acordo com a aparência de um metal corroído.

1.3.1 — Corrosão uniforme ou generalizada

O ataque na superfície do metal apresenta-se com aspecto de distribuição uniforme sobre toda superfície. Há uma diminuição na espessura inicial do metal e conseqüentemente alteração de sua resistência mecânica.

1.3.2 — Corrosão punctual ou por "pit"

O ataque se localiza preferencialmente em certos pontos da superfície; a espessura do metal pode ser totalmente perfurada. O processo deste tipo de corrosão é fundamentalmente eletroquímico.

Os efeitos provocados por este tipo de corrosão são normalmente maiores que os causados pelo tipo uniforme.

1.3.3 — Corrosão cristalina

O ataque se localiza de forma transcristalina ou intercristalina no retículo da rede cristalina do metal. É produzida por processo químico ou eletroquímico, no qual concorrem tensões internas ou externas ao metal.

1.4 — Produto de corrosão

Entende-se por produto de corrosão todo aquele proveniente do processo corrosivo que pode ser identificado e mensurado através de técnicas próprias.

Os produtos de corrosão que têm significado prático, normalmente, são aqueles encontrados sob a forma de depósitos na superfície do metal corroído.

A velocidade com que tais produtos são formados depende, além das características do meio agressivo, também das características da película ou crosta de óxido (*) que se forma na superfície agredida, a qual por sua vez constitui também produto de corrosão.

No processo de corrosão externa de um tubo que se encontra em contato com materiais de construção como argamassa de cimento-areia, cimento-cal, ou concreto, a camada que se forma contém, também, pequenas quantidades destes materiais.

No processo de corrosão interna de um tubo a camada que se forma pode também conter sais advindos da água conduzida.

Em ambos os casos (corrosão interna e externa), se a camada de óxido junto ao metal for homogênea, contínua, compacta, aderente e estável, poderá ocorrer proteção do tubo, impedindo o avanço da corrosão. Neste caso, fala-se que ocorreu **apassivação** do metal (ferro ou aço) (12, 14).

Por outro lado, se não houver **apassivação**, a citada camada, além de não propiciar proteção, pode propiciar corrosão, através da geração de zonas distintamente aeradas (corrosão por aeração diferencial), ou zonas de concentração química distintas (corrosão por concentração diferencial), (12, 14). Portanto, dependendo das características do produto de corrosão e do meio, um processo corrosivo pode ser impedido ou mesmo acelerado.

2 MECANISMO DE PROTEÇÃO DO AÇO PELA GALVANIZAÇÃO

A proteção que a película de galvanizado oferece ao aço como seu substrato é basicamente devido ao

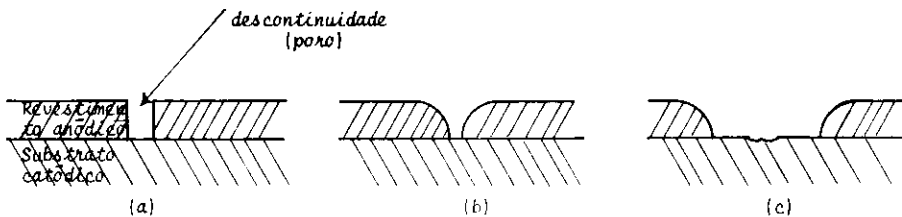


Figura 1 — Ilustração dos efeitos da proteção eletroquímica, produzidos numa mesma descontinuidade de um revestimento, sobre o substrato (a) (b) (c). O revestimento anódico protege sacrificialmente o substrato catódico.

fato de o zinco se constituir num metal que possui um potencial eletroquímico de oxidação maior que o do aço. Nestas condições, o zinco age como um metal de sacrifício, protegendo o aço através das descontinuidades da película de galvanizado, no ambiente em que se encontra. Portanto, isto resulta numa perda do revestimento protetor, que deixa de funcionar como uma barreira mecânica, com o passar do tempo. Desta forma, pode-se admitir a existência de uma corrente galvânica "ideal" entre o ânodo (Zn) e o cátodo (Fe) para os mais variados ambientes, de forma a prolongar ao máximo o tempo de ação protetora do zinco.

A Figura 1 (a), (b), (c) ilustra a ação de um revestimento anódico em relação ao seu substrato, numa descontinuidade, com consequente consumo de revestimento (1).

Se o processo galvânico de proteção consome rapidamente o revestimento, este não se torna mais capaz de agir como barreira mecânica ou de proteger eletroquimicamente o substrato em áreas a alguma distância do revestimento. Os atributos que comandam o desenvolvimento deste processo são basicamente os eletropotenciais anódicos, eletropotenciais catódicos e as características físico-químicas do meio, isto é, do eletrólito.

A Figura 2 ilustra o que ocorre quando o aço é exposto por uma descontinuidade do revestimento de zinco (1). Nota-se que a descontinuidade é preenchida com produtos de corrosão. Os ions Zn^{2+} e OH^- , respectivamente, provenientes da corrosão do zinco (área anódica) e da redução do oxigênio na superfície do aço (área catódica), combinam-se para formar $Zn(OH)_2$ insolú-

vel, embora formem-se preferencialmente carbonatos e sulfatos em ambientes que contenham anions CO_3^{2-} e SO_4^{2-} .

Nos ambientes atmosféricos em que ocorre secagem periódica da superfície metálica, os produtos de corrosão formados tornam-se altas resistências elétricas, protegendo, desta forma, as superfícies do aço e do zinco expostas no interior da descontinuidade. Mesmo que este interior se torne molhado, por condensação de umidade (ou por outra causa), haverá ainda uma alta resistência elétrica entre o aço e o zinco, de modo a diminuir significativamente a corrente galvânica.

Outra característica a ser mencionada é a que diz respeito às águas duras. Estas podem precipitar, para dentro das mencionadas descontinuidades do revestimento, $CaCO_3$, em vista da elevação do pH nas áreas catódicas e da existência de bicarbonato de cálcio em seu seio.

Em suma, pode-se dizer que o mecanismo da ação protetora do revestimento de zinco aplicado ao aço envolve dois aspectos:

a) Proteção eletroquímica do zinco ao substrato (aço);

b) Formação de depósitos de produtos insolúveis de corrosão com características de maus condutores elétricos, os quais preenchem as cavidades das descontinuidades do revestimento, isolando desta forma o substrato do meio e da película de galvanizado. Este preenchimento das cavidades pode se dar também de forma suplementar e por sais insolúveis existentes no meio (água) ou por produtos de corrosão do próprio substrato (aço).

(*) A película ou crosta de óxido constitui uma **camada** diferenciada nominalmente pela espessura, se grossa (crosta) ou se fina (película). Esta crosta ocorre da seguinte maneira (11): inicialmente, o metal se recobre de um filme monomolecular de O_2 , absorvido, que vai penetrando nos interstícios cristalinos do metal provocando uma elevação de pressão de O_2 na interface metal/ O_2 . Nos pontos de conteúdo energético favoráveis, formam-se germes de óxidos. Estes germes crescem em extensão superficial, pois nas zonas laterais é onde se encontra maior saturação de O_2 e, uma vez que toda superfície esteja recoberta por esta capa de óxido, inicia-se o crescimento no sentido da espessura do metal.

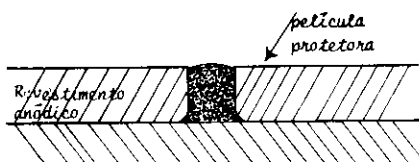


Figura 2 — Ilustração do preenchimento da descontinuidade por produtos de corrosão.

3 CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO (1, 12)

3.1 — Obtenção

A galvanização dos tubos de aço utilizados em instalações hidráulicas domiciliares é usualmente feita através do processo conhecido como "imersão a quente". Este consiste dos seguintes passos:

a) Limpeza das superfícies com ácidos e/ou álcalis para remoção de óleos, graxas e crostas estranhas. Nestes banhos utilizam-se inibidores (*) para evitar ataques indesejáveis na superfície metálica.

b) Imersão em tanque contendo zinco fundido à temperatura de 430°C a 470°C.

Estrutura: Durante a imersão no zinco fundido formam-se películas de ligas de Fe-Zn de diferentes composições, sendo que a liga mais rica em Fe encontra-se adjacente ao substrato de aço e a liga com menor teor de Fe encontra-se subjacente à superfície externa do revestimento, constituída de Zn.

3.2 — Defeitos possíveis

Vários defeitos podem ocorrer no revestimento galvanizado devido ao processo de galvanização, de forma a comprometer a eficiência de proteção contra corrosão; tais defeitos podem ser devidos a:

a) Temperatura do zinco fundido

Temperaturas além das previstas para a operação do processo provocam uma redução na espessura da camada de zinco externa do revestimento. Acima de 480°C ocorre um aumento brusco da velocidade de formação das ligas Fe-Zn.

b) Espessura das camadas da liga Fe-Zn no revestimento

A formação de grandes espessuras de ligas Fe-Zn do revestimento, em relação à espessura externa da película de Zn, diminui a utilidade do revestimento, em vista da natureza de maior fragilidade das ligas Fe-Zn frente ao Zn. Isto pode acarretar desprendimento do revestimento se o tubo for dobrado. Por outro lado, a menor espessura da película externa (zinco) fica com sua capacidade reduzida em propiciar proteção eletroquímica ao substrato. A adição de pequenas doses de Al (0,1 a 0,2%) ao zinco fundido diminui substancialmente a velocidade de formação das ligas Fe-Zn e melhora a utilidade do revestimento.

c) Impurezas formadas durante o processo de imersão

Durante o processo de imersão, a oxidação do zinco fundido a óxido de zinco aumenta a viscosidade do meio e tende a fragilizar o revestimento. Forma-se também durante a imersão uma liga de Fe-Zn (3 a 7% de Fe) que se difunde no zinco fundido, e que por sua vez é pastosa e mais densa que o próprio zinco fundido. Em consequência, tende a se depositar; na superfície do tubo formam-se áreas defeituosas por heterogeneidade do revestimento.

d) Impurezas do zinco

Se o zinco utilizado como matéria-prima para o processo de galvanização não estiver dentro de padrões reconhecidos, a qualidade do revestimento poderá estar completamente comprometida.

A Norma Brasileira "EB-344 — Zinagem em Produtos de Aço ou Ferro Fundido" cita que o zinco a ser empregado para a galvanização por imersão a quente deve ter a seguinte composição química:

Pb	1,60% máx.
Fe	0,05% máx.
Cd	0,50% máx.
Zn	98% mín.

e o material fundido, durante o processo de galvanização deverá ter o teor de Zn igual ou maior que 98 %.

A Norma Alemã "DIN 2444 — Zinc Coatings on Steel Pipes", cita que deve ser obedecida a seguinte composição química para o revestimento galvanizado.

Al	0,1% máx.
Sb	0,01% máx.
As	0,02% máx.
Pb	0,8% máx.

(até 1% em casos individuais)

Cd	0,01% máx.
Cu	0,1% máx.
Bi	0,01% máx.
Sn	0,1% máx.
Zn	restante

4 COMO OCORRE CORROSÃO DE TUBOS GALVANIZADOS NA PRÁTICA

4.1 — Corrosão interna

Os múltiplos fatores intervenientes no desencadeamento e progresso do processo de corrosão interna de tubos galvanizados são atribuídos principalmente a:

a) Características físicas, químicas e/ou hidrobiológicas da água;

b) Velocidade da água e regime hidráulico.

Com base na possibilidade de a água possuir características que propiciem ou não a formação de depósitos de compostos químicos sobre a superfície do tubo, são descritos os principais fenômenos que levam ao desencadeamento e progresso do processo corrosivo. Tais compostos químicos são formados principalmente por sais, ou óxidos ou hidróxidos, todos insolúveis, os quais em função de suas concentrações na massa líquida, temperatura da água, pH, velocidade da água e regime hidráulico, se depositam formando películas de espessura que podem variar de décimos de milímetros até alguns milímetros.

Um dos compostos que participa decisivamente na formação de depósitos é o carbonato de cálcio (CaCO₃). A formação de tal composto consiste num dos objetivos "clássicos" dos processos de tratamento de água para abastecimento público. Visa impedir que se estabeleça um processo de corrosão; o mecanismo deste impedimento baseia-se na premissa de que a película de CaCO₃ bloquearia a passagem de O₂ para as zonas catódicas, evitando desta forma a corrosão. O controle da possibilidade ou não de que uma água tenha a capacidade de formar tal depósito de CaCO₃ é analiticamente feito através da determinação do chamado índice de Langlier (I_L). Por definição I_L = pH - pH_s (12,14) pH = pH real da água pH_s = pH de saturação da água, isto é, o pH de equilíbrio estequiométrico entre os carbonatos e bicarbonatos presentes na água. O gás carbônico, caso esteja em excesso neste equilíbrio, é chamado de CO₂ agressivo.

Nestas condições, se I_L > 0, a água é considerada como tendente à deposição de CaCO₃; se I_L < 0, a água é considerada como não formadora de depósito de CaCO₃; se I_L = 0 há um equilíbrio entre HCO₃⁻ e CO₃²⁻, na água e, portanto, todo carbonato está sendo solubilizado na forma de bicarbonato e, vice-versa, a todo instante.

Para simplificação explanativa podemos dizer:

I_L > 0 água incrustante

I_L < 0 água agressiva

I_L = 0 água em equilíbrio

Na prática, outros compostos participam no processo de formação de película como, por exemplo, hidróxi-

(*) Proporções das soluções químicas empregadas e outros compostos químicos, eventualmente utilizados, constituem objeto de programa de desenvolvimento de qualidade do fabricante de tubo.

do de ferro, silício na forma de SiO_2 , que se incorporam; o pH é fator determinante, porém, não exclusivo na precipitação de tais compostos.

4.1.1 — Ocorrência de corrosão com $I_L > 0$

Conforme visto, a presença de depósitos é devida, entre outros fatores, àqueles descritos em 4.1. Quando tais depósitos não constituem uma camada homogênea, no que tange à espessura, estabelecem-se sobre a superfície do revestimento (zinco), micropilhas de concentração diferencial por O_2 e/ou de concentração química diferencial (concentrações químicas diferentes).

Assim, o zinco primeiramente, e suas ligas Fe-Zn (vide 3.1.) posteriormente, passam a ser consumidos por um processo eletroquímico de corrosão, deixando a superfície do tubo (Fe) em contato direto com todos estes produtos de corrosão que se vão incorporando ao depósito anteriormente referido. A espessura do novo depósito, assim formado, naturalmente torna-se maior com a incorporação de novos compostos químicos, constituídos principalmente de hidróxidos e óxidos de Zn e Fe. Tal depósito ou crosta recebe algumas vezes o nome de **incrustação**, pelo fato de não haver corrosão do aço. Por analogia, se este novo depósito, por último referido, apresentar não homogeneidade quanto à espessura, permeabilidade e aderência, novas pilhas de aeração diferencial e/ou pilhas de diferencial de concentração química formar-se-ão sobre a superfície exposta do tubo, acarretando um aumento na espessura de todo o depósito anterior. Sob condições de ausência de oxigênio no interior do depósito, poderá também ocorrer corrosão com despreendimento de H_2 nas áreas catódicas e formação de Fe_3O_4 (vide 1.2.2). A crosta resultante é conhecida pelo nome de **tuberculização** (14).

A extensão da corrosão pode ser generalizada sobre toda superfície interna do tubo, pode ser localizada em algumas áreas, ou pode concentrar-se em diminutas superfícies. As condições do meio, as características do revestimento galvanizado, a velocidade da água e seu regime hidráulico (contínuo ou intermitente) são os fatores que definirão tal extensão.

4.1.2 — Ocorrência de corrosão com $I_L \leq 0$

Não havendo formação de precipitados associados a CaCO_3 sobre as superfícies do tubo (como no caso de 4.1.1) ocorre o seguinte:

Inicialmente, o óxido de zinco que apassiva a superfície do revestimento galvanizado sofre uma desapassivação. Os íons cloretos e/ou sulfatos existentes na água contribuem para este processo. Estabelecem-se na superfície micropilhas de corrosão e conseqüente formação de produtos de corrosão. Dependendo das condições do meio, tais produtos permanecem aderentes à superfície do tubo ou são atacados por H_2CO_3 advindo do CO_2 agressivo, como se fosse uma lixiviação.

Outro fenômeno que pode ocorrer, simultaneamente ou não, é a corrosão direta do zinco da superfície do galvanizado pela própria ação do meio, levando à formação de hidróxido e/ou carbonatos de zinco. É importante lembrar que o zinco é um metal que tem um comportamento anfótero, podendo, pois, ser atacado tanto em meio ácido, como alcalino; suas menores velocidades de corrosão encontram-se entre pH 7 e 12, à temperatura ambiente (12, 14).

Eliminada a película de zinco, a camada subjacente, formada pelas ligas Zn-Fe, passa a agir como única proteção ao substrato. Por imperfeições, como descontinuidades, motivadas por qualquer causa, passa a ser consumida através de proteção ao substrato por processo eletroquímico, com conseqüente formação de produtos de corrosão (óxidos e hidróxidos de Fe e Zn) na superfície do substrato.

Como $I_L < 0$, não há formação de CaCO_3 . Em conseqüência, o acesso de O_2 às superfícies catódicas fica mais fácil, acelerando decisivamente o processo de corrosão. Formam-se crostas aderentes à superfície do aço com espessuras e características que dependem do meio, normalmente formadas por óxidos e hidróxidos de ferro. Alumínio, zinco, silicatos podem estar presentes, dependendo das características físico-químicas da água. À medida que a crosta se desenvolve, podem ocorrer, como no caso de $I_L > 0$, fenômenos de aeração diferencial e/ou de diferencial de concentração química, acelerando o processo de corrosão.

Sob condições de ausência de O_2 no interior da crosta, poderá ocorrer corrosão com despreendimento de H_2 nas áreas catódicas e formação de Fe_3O_4 (vide 1.2.2).

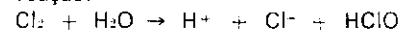
A nova crosta ou depósito assim formado recebe o nome de **tuberculização** (12, 14). Se a água não passar por processo de desinfecção, em casos extremos podem ocorrer bactérias no interior deste tubérculo, acelerando o processo corrosivo.

4.1.3 — Aceleração do processo de corrosão interna

a) Teores de cloretos e sulfatos

Elevados teores de Cl^- e SO_4^{2-} contribuem para um aumento das taxas de corrosão, por causarem uma elevação na condutividade elétrica da água. Particularmente, o íon Cl^- tem importância decisiva nos processos de desapassivação (eliminação de película protetora de óxidos) de superfícies metálicas apassivadas (12, 14), contribuindo, assim, no incremento da taxa de corrosão.

OBS.: O procedimento de cloração da água para fins de potabilidade através da utilização do gás cloro resulta numa contribuição à concentração de Cl^- , no meio, através da reação:



Se o pH aumenta esta reação prevalece no sentido da esquerda para a direita (2).

b) A presença de microrganismos resistentes a doses insuficientes de desinfetante (cloro gasoso, hipoclorito etc.) pode se acentuar em zonas não aeradas dos depósitos formados nas superfícies dos tubos (vide 4.1.1), como é o caso das bactérias sulforredutoras, acelerando o processo corrosivo. Bactérias que vivem em ambiente aerado, como o caso de ferrobactérias, podem também se desenvolver precipitando hidróxidos.

NOTA: Sistemas de abastecimento de água que não adotam desinfecção no tratamento são os mais expostos a estes tipos de desenvolvimento bacteriano.

c) Temperatura da água

Os processos corrosivos, sendo geralmente acelerados pelo aumento da temperatura, têm no caso de tubos galvanizados um fenômeno interessante.

Nas temperaturas superiores a 55-60°C ocorre uma inversão de polaridade do par galvânico Zn/Fe, isto é, o ferro passa a proteger o zinco, sofrendo corrosão (11, 14, 15).

d) Imperfeições do revestimento galvanizado (vide capítulo 3)

Tais imperfeições conduzem a um início ou aceleração de um processo corrosivo (4).

e) Velocidade da água

Sua influência se manifesta através do arraste de depósitos protetores da superfície, bem como por ação de atrito mecânico sobre películas protetoras.

Para ilustrar a influência da velocidade da água no processo corrosivo, ensaios de laboratório, realizados pelo National Bureau of Standards (8), têm seus resultados descritos na página seguinte, para tubos de aço galvanizado.

Composição da água (*)	Veloc. (m/s)	Perda de peso (g)
CaCO ₃ - 80 ppm	~ 0,7	1,68
NaHCO ₃ - 225 ppm	0,46	0,46
NaCl - 60 ppm	3,7	1,40
MgSO ₄ .7H ₂ O - 20 ppm		
pH - 6,0 a 23°C		

Adição de 10 ppm de silício de sódio na composição acima	~ 0,7	0,86
	0,46	0,47
	2,7	1,1

(*) Temperatura do ensaio = 60°C

f) Regime hidráulico

A influência do regime hidráulico sobre a corrosão se manifesta através da alteração da concentração de gases (O₂, CO₂) quando ocorrem mudanças nos intervalos de intermitência. Passagens de regime intermitentes para contínuos e vice-versa também acarretam tal alteração.

Em consequência, ocorrem mudanças nas características do meio, que levam a variações de velocidade da corrosão ao longo do processo.

Água parada, normalmente, acarreta menores velocidades de corrosão, podendo, mesmo, impedir o desenvolvimento do processo corrosivo admitindo-se que, nessas condições, não ocorra renovação de O₂ no meio.

4.1.4 — "Cor de barro" da água significa corrosão do tubo

Não, necessariamente. A primeira conclusão que nos surge quando abrimos uma torneira e constatamos uma coloração castanho-claro até um marrom-escuro é que esteja ocorrendo um processo de corrosão do tubo. Isto pode ser verdade se a água não passa por processos de tratamento prévio em unidades de floco-coagulação, decantação e filtração. Em sistemas públicos de abastecimento de água adotam-se com frequência tais tratamentos.

Utilizam-se para floculação agentes químicos como sulfato de alumínio, cloreto férrico ou outros.

Se o processo de floco-coagulação, associado aos processos de decantação e filtração apresentarem deficiências operacionais, elementos químicos como Al ou Fe sob a forma de íons ou hidróxidos, poderão ser carregados para o efluente final do sistema de tratamento. Na fase de adução da água poderão ocorrer reações químicas (função de pH, temperatura

etc) capazes de gerar compostos que sob condições adequadas (velocidade da água, regime hidráulico, solubilidade e outros fatores) são carregados para o domicílio ao qual se destina a água.

No sistema hidráulico domiciliar, caso haja condições propícias de deposição/solubilização de tais compostos, poderemos ter aparecimento dos mesmos na água, quando abrimos uma torneira ou registro. Em tais ocasiões observa-se a referida cor, cuja tonalidade varia em função da concentração de tais compostos. Reparos frequentes ou ampliações da rede de água, por parte da companhia de água local, poderão provocar entrada de material estranho na rede, contribuindo para os fenômenos acima descritos.

Se um processo corrosivo estiver se desenvolvendo nas tubulações domiciliares, os referidos compostos podem contribuir para sua aceleração ou eventualmente para seu desencadeamento, pois, conforme vimos em 4.1, podem participar da formação de camadas na superfície do tubo que, devido a fenômenos de aeração ou concentração química diferencial, geram pilha de corrosão.

Portanto, é necessário prudência nas conclusões quando da constatação de água "cor de barro" em nossas torneiras.

4.2 — Corrosão externa

Numa edificação, os tubos galvanizados têm suas superfícies externas em contato com diversos meios que contêm cimento.

Este é o maior responsável pela corrosão de tubos de aço galvanizado.

Segundo publicação da Abraco (13), os problemas de corrosão externa de tubos de aço galvanizado se acen-tuaram a partir de 1960, tendo como suspeita agravante do mal a utiliza-

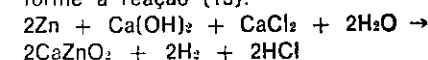
ção indiscriminada de aditivos nas argamassas para acelerar o término das obras.

Uma argamassa é, em sua fase líquida, essencialmente uma solução de hidróxidos de cálcio e de outros hidróxidos alcalinos, que apresenta um pH por volta de 12 a 13, a 25°C. (15)

Os aditivos utilizados que têm sido acusados de promover corrosão em aço galvanizado são os aditivos de pega e endurecimento que normalmente contêm CaCl₂ (13). O íon Cl tem sido reconhecido como responsável pela sua capacidade de destruir películas protetoras de óxido (desapassivação) em superfícies metálicas, como de zinco, ferro e outros metais, além de aumentar a condutividade elétrica do meio (13, 14).

4.2.1 — Etapas do processo corrosivo

Inicialmente, o tubo galvanizado em contato com a argamassa sofre na superfície da galvanização um ataque com formação de óxidos, hidróxidos e/ou zincatos. Lembramos que pH maior que 11 acelera a corrosão do zinco (12, 14). Tais produtos permanecem mais ou menos aderentes à superfície do tubo de acordo com o grau de umidade do meio. Desta forma, criam-se em função da permeabilidade destes compostos zonas de aeração e/ou de concentração química diferenciadas nesta superfície, advindo o aparecimento de pilhas de corrosão eletroquímica. O maior ou menor acesso de oxigênio determina a aceleração do processo. Se o meio contém CaCl₂ poderá ocorrer liberação de HCl conforme a reação (13):



O ácido contribuiria para atacar o zinco e o ferro do substrato, produzindo cloretos de zinco e ferro. Estes, por serem muito higroscópicos e deliquescentes, concentram excesso de umidade da superfície do concreto para a direção da superfície do metal, acelerando o processo corrosivo.

Se o meio não contém CaCl₂, os próprios produtos da corrosão do zinco da galvanização, desde que não formem uma capa homogênea e impermeável na superfície do aço, promovem analogamente, zonas de aeração ou de concentração química diferenciada, advindo daí o processo de corrosão por pilhas eletroquímicas.

4.2.2 — Conteúdo de cloretos na argamassa em contato com o tubo

4.2.2.1 — Aditivos

Um levantamento de aditivos de pega e endurecimento para argamas-

sas existentes no mercado revelou os seguintes teores (*) de cloretos e sulfatos (13):

ADITIVOS	FINALIDADE	%	
		CLORETO	SULFATO
A	Acelerador de pega sem retração	17,2	Traços
B	Acelerador de pega sem aumento de retração	15,9	Ausente
C	Acelerador de pega e endurecimento	14,7	Traços
D	Impermeabilizante de pega normal	2,8	Traços
E	Impermeabilizante para concreto e argamassa	1,97	Ausente
F	Impermeabilizante e pega ultra rápido	0,04	Traços
G	Impermeabilizante e plastificante para argamassa pré-fabricada	0,03	0,45

(*) Método de ensaio: Norma Belga NBN T 61-201/1978 do Instituto Belga de Normalização (LNB).

4.2.2.2 — Cimento

Autores que consideram o Cl^- como agressivo, de uma maneira geral, citam que seu teor não deve ser superior a 0,4% (9) em relação ao peso do cimento, embora alguns admitam até 1,5% (10).

A Norma Técnica alemã DIN 1164 "Portland Ciment, Iron Portland, Blast Furnaci and Trasscement" estabelece teor máximo de 0,1% de cloreto no cimento.

Tubos de aço galvanizado, que perduram há longo tempo sem sofrer corrosão externa, podem ter sofrido um fenômeno de apassivação da superfície metálica por traços de cromato do cimento. Isto até hoje é objeto de controvérsia em outros países (13, 15).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em vista da complexidade do fenômeno de corrosão de tubos de aço galvanizados e dos problemas que acarreta aos usuários que sofrem com este mal, apresentamos a seguir algumas conclusões e recomendações:

a) Execução de ensaios físico-químicos e eventualmente hidrobiológicos da água a ser conduzida pelos tubos. Seus resultados devem ser interpretados por pessoal com vivência no campo da corrosão, o qual concluirá sobre a conveniência ou não da adoção destes tubos. Para instalação hidráulica em funcionamento, e que se deseja combater um "eventual estágio de um processo corrosivo", recomenda-se a determinação dos seguintes parâmetros da água antes e depois de passar pela instalação:

Zn, Al, Pb, Fe, OD, pH, pHs, cor, condutividade, alcalinidade, sulfatos, cloretos, CO_2 .

Tais resultados devem, também, ser analisados por pessoal com vivência na área de corrosão.

b) Deve ser terminantemente rejeitada a utilização de tubos de aço galvanizado para condução de água quente (temperaturas maiores que 55°C). Nestas temperaturas o aço (anodo) passa a proteger a película do galvanizado (cátodo) inutilizando desta forma a finalidade deste último, que é a de proteger a superfície do aço contra a corrosão;

c) As uniões de tubos na obra, através de conexões ou juntas, devem ser feitas com cuidado para evitar danos no revestimento de galvanizado. Para as rosca que vierem a sofrer perda da galvanização recomenda-se que estas sejam pintadas com tinta à base de óxido de zinco e secadas antes de serem feitas as uniões dos tubos;

d) No caso de reparos para troca de trechos de tubos já instalados e com algum tempo de uso, recomenda-se, quando as pressões hidráulicas permitirem, a adoção de juntas ou conexões de PVC. Isto impedirá o estabelecimento de uma pilha eletroquímica de corrosão, visto que o tubo a ser instalado não tem o grau de apassivação já adquirido pelo tubo ao qual será unido;

e) Não utilizar conexões ou juntas de materiais metálicos outros que não aço ou ferro galvanizado, para impedir formação de pares galvânicos;

f) Sejam desenvolvidas e incentivadas práticas de engenharia para evitar o contato do tubo com argamassa. No caso de instalações hi-

dráulicas originariamente já em contato com argamassa, em casos de vazamento, recomenda-se que quando efetuados os reparos, procure-se secar (em muitos casos, pode-se utilizar um secador manual elétrico de cabelos) ao máximo a argamassa atingida pelo vazamento de água. Isto impedirá condições propícias ao desenvolvimento de novos focos de corrosão externa;

g) Evitar o emprego da prática de dobramento de tubos, para elaboração de curvas. Além de propiciar trincas no revestimento, o tubo fica sujeito a eventuais tensões residuais, condutoras a um processo de corrosão;

h) Adquirir tubos de fabricação idônea, cujos fabricantes, além de seguir Normas Técnicas reconhecidas, desenvolvem qualidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 — Carter, V. E. *Metallic coatings for corrosion control*. London, Newnes Butterworths, 1977.
- 2 — Cetesb. *Técnica de abastecimento de água*. São Paulo, 2.ª ed., Vol. (1), 1977.
- 3 — Costello, J.J. Post precipitation in distribution system. *J. Amer. Water Works Assoc.* 46-9, Nov. 1984.
- 4 — Fox, K.P. et al. The interior surface of galvanized steel pipe, a potential factor in corrosion resistance. *J. Amer. Water Works Assoc.*: 84-86, Feb. 1983.
- 5 — Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Corrosão e proteção contra corrosão de metais. *Publicação n.º 1127*, São Paulo, 1981.
- 6 — Kirmeyer, G. J. & Logsdon, G. S. Principles of internal corrosion and corrosion monitoring. *J. Amer. Water Works Assoc.*: 78-83, Feb. 1983.
- 7 — Mange, C.E. Corrosion of galvanized steel in contact with concrete containing calcium chloride. *Materials Performance*: 34-36, Jul. 1977.
- 8 — N.B.S. Corrosion of metallic pipes transporting potable water: Laboratory testing methods. *Technical Note 974*. Washington, D.C., U.S. Department of Commerce, Jun. 1978.
- 9 — Rauen, A. Investigation of the corrosion behaviour of galvanized steel reinforcement in concrete. *Intergava* 70: 419-424.
- 10 — Rixon, M.R. *Chemical admixtures for concrete*. London, John Wiley, 1978.
- 11 — Rodriguez, C.O. Durabilidad de las conducciones metálicas de agua en la edificación, causas y remedios. (Parte 1). *Monografía n.º 367*, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1981.
- 12 — Speller, F.N. *Corrosion — causes and prevention*. N. York, 3.ª ed. Mac Graw Hill, 1951.
- 13 — Tanaka, D.K. et al. Corrosão de canos galvanizados por argamassa com aditivos. In: Senacor - Seminário Nacional de Corrosão, 8.º. *Anais. Simpósio Nacional de Corrosão na Produção e Utilização de Alcool*, 1.º.
- 14 — Uhlig, H.H. *The corrosion handbook*. 9.ª ed. New York, John Wiley, 1966.
- 15 — Wolyneec, S. Corrosão de tubos galvanizados empregados na construção civil. *A CONSTRUÇÃO*, (1983), 1984.