

Manifestações patológicas em estruturas de concreto de estações de tratamento de esgoto*

NAYARA GRACYELLE DIAS – ENG. | SANEAGO | HELENA CARASEK – PROF. DR. – <https://orcid.org/0000-0002-1170-0980> ;
OSWALDO CASCUDO – PROF. DR. – <https://orcid.org/0000-0003-1879-6396> | UFG

RESUMO

O AMBIENTE DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETEs) É CLASSIFICADO COMO UM DOS MAIS AGRESSIVOS PARA O CONCRETO. ESTE TRABALHO TEM COMO OBJETIVO LEVANTAR AS PRINCIPAIS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO DE ETEs, ANALISANDO A INFLUÊNCIA DE VÁRIOS FATORES NA DETERIORAÇÃO, COMO: IDADE DA ESTRUTURA, CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO, UNIDADE DE TRATAMENTO E TIPO DE TRATAMENTO ADOPTADO NA ETE. FORAM ESTUDADAS SETE ETEs EXISTENTES NA CIDADE DE GOIÂNIA – GO, BRASIL, SENDO: TRÊS DO TIPO LAGOA, TRÊS DO TIPO REATOR UASB + BIOFILTRO + DECANTADOR SECUNDÁRIO E UM DO TIPO TRATAMENTO PRIMÁRIO QUIMICAMENTE ASSISTIDO. NESTE CONTEXTO, A METODOLOGIA EMPREGADA ENVOLVEU A REALIZAÇÃO DE ESTUDOS DE CASO, CONTENDO LEVANTAMENTOS DE CAMPO. OS PRINCIPAIS PROBLEMAS IDENTIFICADOS NO CONCRETO E NA ESTRUTURA FORAM A EROSIÃO, A CORROSÃO DAS ARMADURAS E A BIODETERIORAÇÃO. A IDADE DA ESTAÇÃO NÃO APRESENTOU GRANDE INFLUÊNCIA NO NÍVEL DE DETERIORAÇÃO, EXCETO NAS ETEs TIPO REATOR UASB + BF + DS, EM QUE A ESTAÇÃO MAIS ANTIGA APRESENTOU MAIOR DETERIORAÇÃO. OS TIPOS DE ESTRUTURA DE CONCRETO FAVORECEM A OCORRÊNCIA DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS CARACTERÍSTICAS COMO EROSIÃO NO TRATAMENTO

PRELIMINAR, CORROSÃO DAS ARMADURAS NOS POÇOS DE SUÇÃO E CORROSÃO DO CONCRETO NO TANQUE DE CONTATO. PROCESSOS DE BIODETERIORAÇÃO NO CONCRETO FORAM DETECTADOS EM TODAS AS UNIDADES E TIPOS DE TRATAMENTO, TENDO EM VISTA QUE AS ETEs PRODUZEM UM MICROCLIMA FAVORÁVEL AO DESENVOLVIMENTO DE MICROORGANISMOS. O TIPO DE TRATAMENTO PODE INFLUENCIAR NA INTENSIDADE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS, PORÉM É NECESSÁRIO CONSIDERAR VÁRIOS FATORES QUE TAMBÉM CONTRIBUEM PARA A DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS, COMO, POR EXEMPLO, A VAZÃO E A IDADE DA ETE. CONCRETOS COM f_{ck} E COBRIMENTOS MAIS ELEVADOS APRESENTARAM MENOR INCIDÊNCIA DE DETERIORAÇÃO.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO, ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO – ETE, MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA, CORROSÃO DAS ARMADURAS.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade do concreto está relacionada com as condições ambientais às quais as estruturas estarão expostas. Dessa forma, uma correta especificação do tipo de concreto a ser adotado em relação à sua resistência, cobrimento, relação água/cimento e consumo de cimento consiste em uma ação básica, no campo prescritivo, de modo

a dotar o concreto de uma capacidade mínima de proteção frente aos agentes agressivos. Ações mais efetivas transcendendo a esse campo prescritivo dizem respeito a uma abordagem mais sofisticada, baseada no desempenho. Neste contexto, indicadores de durabilidade e modelos preditivos de vida útil são empregados com vistas à concepção estrutural e à especificação do concreto visando ao cumprimento de uma vida útil de projeto e, portanto, visando ao alcance da durabilidade inicialmente almejada (CASCUDO, 2015).

Atendo-se à abordagem prescritiva, existem diversas normas e códigos internacionais que classificam a agressividade do meio e determinam parâmetros de especificação de concretos, como é o caso do código americano ACI 318 M-08 (ACI, 2008), da norma europeia EN 206-1 (EN, 2000) e da norma britânica BS 8500-1 (BS, 2006). O Brasil trata do assunto nas normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2015). A Tabela 1 apresenta os parâmetros prescritos pelas normas brasileiras para estruturas localizadas em ambientes quimicamente agressivos.

As Estações de Tratamento de Esgoto invariavelmente ocasionam um meio

TABELA 1

REQUISITOS DE PROJETO PARA ESTRUTURAS DE CONCRETO SUJEITAS A AMBIENTES QUIMICAMENTE AGRESSIVOS (CAA IV) DE ACORDO COM NORMAS BRASILEIRAS

Norma	Classificação ambiental	Relação água/cimento	Resistência característica à compressão – f_{ck} (MPa)	Cobrimento nominal mínimo (mm)	Consumo de cimento (kg/m³)
NBR 6118 e NBR 12655	IV	≤ 0,45	≥ 40	45 (laje) ou 50 (viga/pilar)	≥ 360

* ARTIGO ORIGINALMENTE PUBLICADO NAS ATAS II DO ENCONTRO LUSO-BRASILEIRO DE DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO (DEGRADA 2016), REALIZADO EM LISBOA, NO LNEC, ENTRE 27 E 29 DE SETEMBRO DE 2016 (<http://degrada2016.lnec.pt/index.html>), COM EXPRESSA AUTORIZAÇÃO DA COMISSÃO ORGANIZADORA DO REFERIDO EVENTO PARA PUBLICAÇÃO NA EDIÇÃO 110 DA REVISTA CONCRETO & CONSTRUÇÕES.

TABELA 2

INFORMAÇÕES TÉCNICAS E OPERACIONAIS DAS ETEs ESTUDADAS

ETE	Ano de início de operação	Tipo de tratamento	Vazão projeto (L/s)	Vazão tratada (L/s)
A	1988	Lagoas facultativas aeradas	30	37,81
B	2014	Reator UASB (UASB) + Biofiltro (BF) + Decantador secundário (DS)	9	3,65
C	2008	UASB + BF + DS	4	1,02
H	2004	Tratamento primário quimicamente assistido	2290	1415
J	2012	UASB + BF + DS	40	5,9
P	1984	Lagoas anaeróbias + Lagoa facultativa	90	110,29
S	2004	Lagoa facultativa + Lagoa de maturação	9	1,75

agressivo à estrutura de concreto durante o tratamento dos efluentes e, por esse motivo, a classe de agressividade ambiental IV (a mais elevada) se aplica bem nessas circunstâncias.

Vários autores têm pesquisado as causas e influências ambientais que podem ocasionar ou aumentar o grau de deterioração de estruturas de concreto pelo esgoto. Bond *et al.* (2014) estudaram como a concentração do gás H_2S , a umidade relativa do ar e a temperatura podem influenciar a taxa de corrosão do concreto. Shirakawa (1994), Gu *et al.* (1998), Nica *et al.* (2000) e Gianantonio *et al.* (2008) contribuíram nesse tema com pesquisas relacionadas à deterioração causada por microrganismos. Moradian *et al.* (2012), por sua vez, ressaltam que apesar de muitas pesquisas darem ênfase à deterioração do concreto ocasionada pelas atividades bacteriológicas, existe a necessidade de que as manifestações patológicas nas unidades de sistemas de esgotamento sejam avaliadas de modo sistêmico, ou seja, considerando os aspectos gerais que cercam os processos de degradação.

Dentro desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo levantar as principais manifestações patológicas verificadas nas estruturas de concreto de ETEs, buscando-se analisar a influência dos seguintes fatores na deterioração: idade da ETE, características de projeto do concreto, tipo de estrutura (unidade de tratamento) e tipo de tratamento adotado na ETE, discutindo os mecanismos de deterioração a que as unidades estão sujeitas.

2. METODOLOGIA

Foram estudadas, então, sete ETEs existentes na cidade de Goiânia - GO, Brasil, com diversificados tipos de tratamento. Sem caráter estatístico, os estudos de caso foram realizados com auxílio de procedimentos de levantamento de campo, tendo como base a análise visual das manifestações patológicas detectadas, acompanhada de registro fotográfico. Para cada estação foram levantados dados relativos à idade e aos tipos de tratamento dos efluentes e, também, dados de projeto como f_{ck} , cobrimento nominal, relação água/cimento e consumo de cimento. A Tabela 2 apresenta as principais informações operacionais das estações de tratamento estudadas.

Do ponto de vista da análise, visando quantificar a intensidade e a extensão dos danos, atribuiu-se uma classificação numérica, variando de 0 a 3 (quatro níveis), aplicada a cada unidade de tratamento e por tipo de manifestação patológica do concreto, sendo que 0 (zero) corresponde à inexistência de manifestação patológica, 1 (um) corresponde a uma incidência branda do problema, 2 (dois) refere-se a uma incidência moderada e 3 (três) significa uma manifestação intensa do problema. Este procedimento teve como intenção excluir da análise uma abordagem meramente qualitativa, com elevado teor de subjetividade, porém se trata, ainda, de uma metodologia incipiente. A pesquisa, que se encontra em andamento, pretende desenvolver ou aprimorar um procedimento de

análise que leve em conta, de forma discretizada e ponderada, a intensidade, a extensão e a gravidade da manifestação patológica, além da relevância estrutural dos elementos envolvidos (CASCUDO, 2009).

Sperling (2014) classifica os níveis de tratamento de esgotos em quatro: preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar remove, por processos físicos, materiais de maiores dimensões e areia. O tratamento primário tem como objetivo a remoção de sólidos sedimentáveis e um pouco de matéria orgânica, também por processos físicos. O secundário envolve a remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica, desta feita, por meio de atividades biológicas. O tratamento terciário tem como finalidade a remoção de nutrientes como fósforo, potássio e nitrogênio, além de microrganismos patogênicos.

Assim sendo, as ETEs do presente estudo foram classificadas de acordo com o nível de tratamento, de modo a possibilitar a análise das manifestações patológicas relacionando-as com os níveis de tratamento (Figura 1). Salienta-se, no entanto, que os poços de sucção não fazem parte de nenhum nível de tratamento, uma vez que são unidades de transporte do esgoto; contudo, foram deixados na figura (dentro dessa classificação) somente para facilitar a representação esquemática, sendo analisados separadamente *a posteriori*. A Figura 1 ilustra o fluxo esquemático de tratamento, com as principais unidades de cada estação estudada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para auxílio nas análises, foram levantadas informações de projeto, as quais foram obtidas junto à empresa responsável pelas estações de tratamento e deram origem à Tabela 3.

A Tabela 4 representa os resultados obtidos no levantamento das manifestações patológicas nas unidades de cada estação e a idade de cada uma. Nela é apresentada a avaliação do grau de intensidade das manifestações, classificado de zero a três.

Na avaliação das idades das estações, não foi verificada uma tendência geral de maior deterioração com a maior idade. Porém, quando a análise foi somente entre as estações que tratam pelo tipo UASB + DS + BF (ETEs B, C e J), essa correlação direta entre a idade das estações e a deterioração

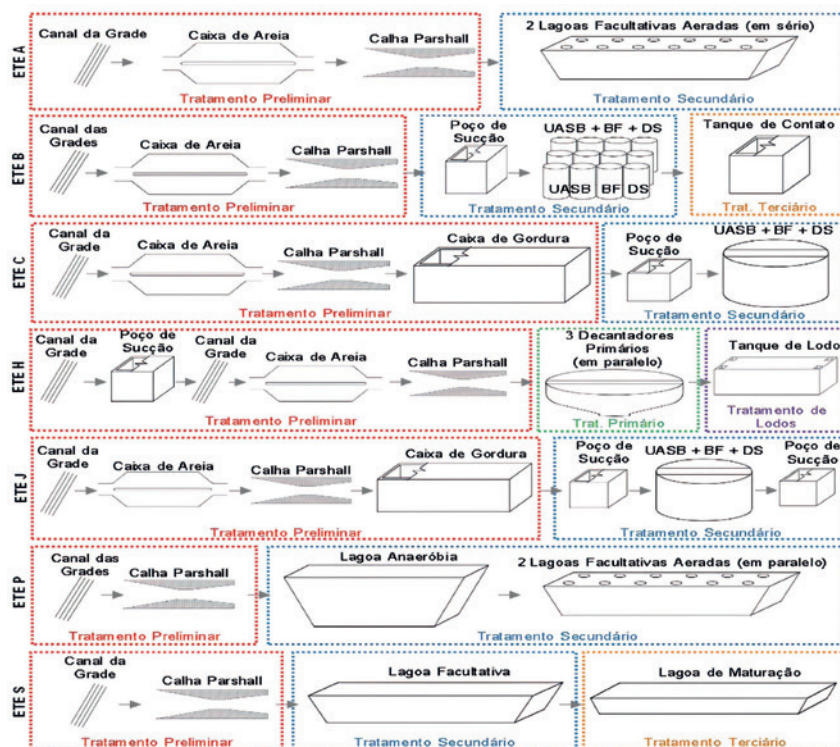


FIGURA 1
UNIDADES DE TRATAMENTO DAS ETEs ESTUDADAS

Obs: todas as unidades de tratamento são em concreto armado, exceto os Reatores UASB (UASB) + Biofiltro (BF) + Decantador Secundário (DS), das ETEs B, C e J, que são construídos em fibra de vidro ou metálicos revestidos com fibra de vidro. As calhas Parshall de todas as estações são em concreto, porém o medidor de vazão é de fibra de vidro.

TABELA 3
ESPECIFICAÇÃO DOS CONCRETOS NOS PROJETOS ESTRUTURAIS DAS ETEs ESTUDADAS

ETE	Unidade de tratamento	f_{ck} (MPa)	Cobrimento nominal (mm)	Relação a/c máxima	Consumo de cimento (kg/m³)
ETE B	Tratamento preliminar	30	5	0,6	*NI
	Poço de sucção	30	3 - 4,5	0,48 ou 0,55	*NI
	Tanque de contato	30	3 - 5	0,48 ou 0,55	*NI
ETE C	Tratamento preliminar	25	4	0,45	370
	Caixa de gordura e poço de sucção	20 ou 25	3 ou 4	0,45	350 ou 370
	Canal da grade e poço de sucção	35	3 - 4	0,5	350
ETE H	Tratamento preliminar	25	4	0,45	450
	Decantadores primários	25	4	0,45	450
	Tanque de lodo	35	2,5 ou 4	0,5	350
ETE J	Trat. preliminar e caixa de gordura	40	4,5	0,45	*NI
	Poço de sucção	40	4	0,45	380
	Poço de sucção	40	4,5	0,45	380

*NI = NÃO INFORMADO NO PROJETO. EM TODOS OS PROJETOS ERA INDICADA A UTILIZAÇÃO DE CIMENTO CP III ou CP IV e A ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA DE 8 A 12% EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO (EM MASSA). OS PROJETOS ESTRUTURAIS DAS ETEs A, P E S NÃO FORAM VERIFICADOS.

ficou evidenciada, ressaltando que quanto mais antiga a estação, mais deteriorada ela estava.

Entretanto, é importante salientar que a idade da estação não é fator preponderante para definir a intensidade de deterioração, uma vez que há outras questões importantes que também contribuem para a incidência das manifestações patológicas, como, por exemplo, o processo de tratamento que a ETE utiliza e as especificações de projeto, além das características apresentadas por cada efluente, que, neste trabalho, não foram avaliadas. Portanto, as análises das manifestações patológicas e suas respectivas causas aparecem associadas a vários eventos e nenhum deles pode ser considerado sozinho responsável por toda e qualquer deterioração observada, pois há uma combinação de fatores que terminam por ocasionar mais de uma patologia ou levar ao aparecimento de outras.

A Figura 2 ilustra a ocorrência de biodeterioração no concreto. Na Tabela 4, pode-se observar que esta anomalia, seguida da erosão, foram os problemas mais frequentes e de maior intensidade nas ETEs analisadas. Na sequência, são discutidos os mecanismos de deterioração de cada manifestação patológica e os fatores principais que contribuem para que determinada patologia esteja associada a uma unidade de tratamento.

TABELA 4

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS OBSERVADAS E O GRAU DE DETERIORAÇÃO, CONSIDERANDO A ETE E A UNIDADE DE TRATAMENTO

ETE	Idade (anos)	Unidade de tratamento	Erosão	Corrosão armaduras	Corrosão concreto	Biodeterioração
A	28	Canal da grade	2	0	1	3
		Caixa de areia	3	0	1	2
		Calha Parshall	3	0	1	2
		Lagoas facultativas aeradas	1	0	1	1
B	2	Canal da grade e caixa de areia	1	0	0	2
		Calha Parshall	1	0	0	2
		Poço de sucção	0	3	1	2
		Tanque de contato	0	1	3	3
C	8	Canal da grade e caixa de areia	2	1	1	2
		Calha Parshall	3	1	1	2
		Caixa de gordura	2	3	1	1
H	12	Poço de sucção	0	3	1	3
		Canal da grade 2	1	0	3	3
		Caixa de areia	0	0	0	3
		Calha Parshall	0	0	0	3
		Decantadores primários	1	3	1	2
		Tanque de lodo	0	3	3	3
		Canal da grade	1	0	0	2
J	4	Caixa de areia	1	0	0	3
		Calha Parshall	1	0	0	3
		Caixa de gordura	0	2	0	1
		Poço de sucção	1	0	0	2
		Poço de sucção	NV	1	0	NV
		Canal da grade e calha Parshall	2	3	1	2
P	32	Lagoa anaeróbia	0	0	1	1
		Lagoa facultativa aerada	0	0	1	1
		Canal da grade	2	0	1	3
S	12	Calha Parshall	0	0	0	3
		Lagoa facultativa	0	0	1	1
		Lagoa de maturação	0	0	1	1

NV (NÃO VERIFICADO — SEM ACESSO AO LOCAL), INTENSIDADE: 0 — INEXISTENTE; 1 — POUCA INTENSIDADE; 2 — INTENSIDADE MÉDIA; 3 — GRANDE INTENSIDADE. O POÇO DE SUÇÃO DA ETE C E O CANAL DA PRIMEIRA GRADE DA ETE H NÃO FORAM INSPECIONADOS.

A biodeterioração foi observada em praticamente todas as unidades de todas as estações. Esta deterioração pode ser ocasionada por diferentes tipos de bactérias por meio da interação entre o meio, o material suporte e a comunidade microbiana. O ataque biológico pode proporcionar tanto o ataque químico, com a produção de ácidos pelos microorganismos, como, eventualmente, pode produzir um efeito físico, na medida em que ocasiona fissuras (por deposição de produtos expansivos no interior da estrutura porosa do concreto) (PEREIRA 2014; SHIRAKAWA, 1994). Alternativamente, a biodeterioração no concreto também pode ser causada por fungos,

caso em que há a dissolução da portlandita e dos silicatos de cálcio hidratados da pasta de cimento endurecida, em virtude dos ácidos produzidos, gerando manchas de diversas colorações que prejudicam o aspecto visual do concreto (GAYLARDE; GAYLARDE, 2002). Os esgotos domésticos possuem, além de diversas substâncias químicas diluídas, uma grande variedade de microorganismos dispersos em seu meio aquoso. Os microorganismos, para se desenvolverem, necessitam de nutrientes em quantidade suficiente e de substratos, de modo que esses dois fatores produzem, nas ETEs, microclimas favoráveis à ocorrência de processos de biodeterioração,

independentemente da unidade de tratamento, do processo de tratamento ou da idade da estação. Este tema é bastante relevante e complexo e não se pretende aqui esgotá-lo, mas apenas evocar as causas básicas de sua ocorrência nos ambientes das ETEs.

A deterioração do concreto por erosão não apresentou correlação com o tipo de tratamento, tendo ocorrência importante tanto na ETE C (UASB + BF + DS) quanto na ETE S (lagoas), conforme observado na Tabela 4. Este problema de ordem física no concreto foi verificado de forma intensa, principalmente no tratamento preliminar (Figura 3), que é responsável pela remoção da areia, e,



FIGURA 2

BIODETERIORAÇÃO: (A) NA PAREDE LATERAL DA CAIXA DE AREIA; (B) NA PAREDE DE FUNDO DA CALHA PARSHALL DA ETE H; E (C) NA CAIXA DE PASSAGEM ENTRE AS LAGOAS DA ETE P

também, em locais que apresentam mudança de regime de escoamento, como na saída da calha Parshall (onde ocorrem ressaltos hidráulicos). A deterioração por erosão ocorre pela passagem do líquido contendo partículas sólidas em suspensão, ocasionando o desgaste superficial do concreto e promovendo, assim, a remoção da pasta superficial de cimento, o carreamento do agregado miúdo e a exposição do agregado graúdo (SANTOS, 2012). Os esgotos transportam uma significativa quantidade de areia e essa quantidade será variável conforme os hábitos dos usuários da rede coletora de esgotos, conforme a estação do ano (na estação chuvosa há um aumento na quantidade de areia que chega às estações) e, também, em função das características do solo. Dessa forma, a erosão aparecerá em menor ou maior escala de acordo com esses fato-

res mencionados. É importante salientar que partículas de areia em suspensão propiciam aos efluentes uma elevada capacidade de desgaste superficial, uma vez que os grãos de quartzo que constituem majoritariamente as areias naturais apresentam valores elevados de dureza (igual a 7 na escala Mohs).

A corrosão do concreto aqui reportada diz respeito à degradação química do concreto decorrente da redução de sulfatos a sulfetos (conhecidos como sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico, H_2S) nos efluentes de esgoto. Este gás é extremamente corrosivo e ataca a pasta de cimento do concreto, sendo um dos responsáveis pelo odor característico dos esgotos. Essa ação ácida também altera o ambiente altamente alcalino do concreto, podendo produzir ações de neutralização do meio, induzindo, assim, aos processos corrosivos das ar-

maduras. A U.S.EPA (1985 *apud* SILVA, 2007) expõe vários fatores relacionados a uma maior produção de sulfetos, tais como: a concentração de sulfatos, a área superficial, a quantidade de oxigênio disponível no esgoto e o tempo de detenção hidráulica, além da temperatura e pH. A ação do H_2S na deterioração das estruturas começa quando ele entra em contato com o oxigênio presente no ar. Ocorre, portanto, oxidação do gás sulfídrico (H_2S), que se converte em ácido sulfúrico (H_2SO_4), o qual ataca o concreto, iniciando esses processos de corrosão (SAWYER *et al.*, 2003).

A corrosão das armaduras foi verificada com maior intensidade (Tabela 4) na ETE C, que trata o esgoto pelo UASB + BF + DS, na ETE H (tratamento quimicamente assistido) e na ETE P (tratamento à base de lagoas). Portanto, numa análise inicial, pode-se dizer que

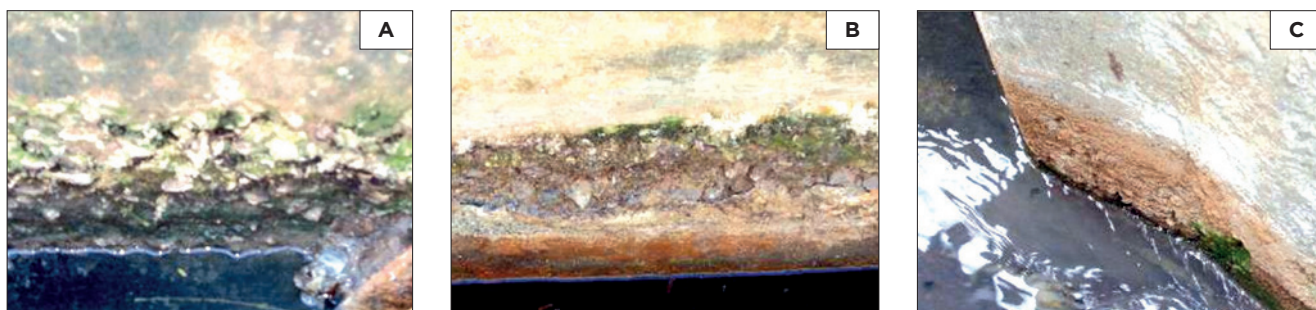


FIGURA 3

EROSÃO: (A) NO CANAL DA GRADE DO EFLUENTE ETE S; (B) NA PAREDE LATERAL DA CAIXA DE AREIA DA ETE A; E (C) NA SAÍDA DA CALHA PARSHALL DA ETE C

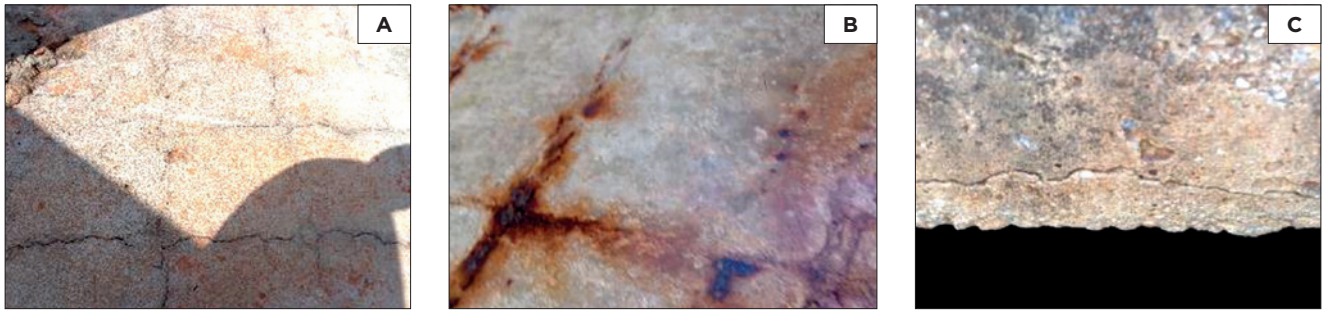


FIGURA 4

CORROSÃO DA ARMADURA DA LAJE DE POÇOS DE SUÇÃO: (A) VISTAS DAS FACES SUPERIOR E (B) INFERIOR NA ETE B, E (C) TRINCA POR CORROSÃO NA ETE H

o tipo de tratamento não apresentou correlação com a corrosão, porém cada estação citada anteriormente apresentou características peculiares que explicam essa grande incidência de corrosão das armaduras em estações com conceitos de tratamento tão diversificados, lembrando sempre que os parâmetros do concreto como f_{ck} , cobrimento e relação a/c serão sempre fatores correlacionados. A seguir, têm-se algumas considerações sobre as ETEs C, H e P, bem como sobre o nível de agressividade dos ambientes e sua relação com a corrosão das armaduras.

1. A ETE C trata o esgoto pelo sistema anaeróbio. Sistemas de tratamento de efluentes do tipo anaeróbio podem proporcionar altos níveis de gás sulfídrico no ambiente devidos à ação de bactérias anaeróbias que reduzem sulfatos a sulfetos (CHER-

NICHARO 2007). Tais características proporcionam um ambiente mais agressivo que os demais, principalmente se o tempo de permanência dos esgotos dentro da estação estiver maior que o previsto em projeto (SILVA, 2007).

2. A ETE H trata 1415 L/s de esgoto, o que corresponde a 90% de todo o esgoto tratado. Tendo em vista esse grande volume de esgotos na estação, é esperado que, mesmo o tratamento não sendo anaeróbio, haja uma considerável concentração de H_2S no ambiente, favorecendo a corrosão das armaduras.
3. A ETE P é a mais antiga (32 anos); portanto, a corrosão das armaduras tende a um aumento natural devido ao grande tempo de exposição das unidades à agressividade do meio, entre outros fatores. Neste caso, o

fator idade certamente se mostra significativo.

Para as estações que possuíam dados completos de especificação de projeto das estruturas de concreto, foram confrontados esses parâmetros do concreto com a intensidade das deteriorações verificada nos poços de sucção. E foi possível observar o efeito combinado das propriedades/características do material concreto com a espessura de cobrimento das armaduras. Como esperado, em geral, quanto menor a relação água/cimento (e consequentemente maior o f_{ck}) menos deteriorada está a estrutura do poço de sucção. Da mesma forma, quando se aumenta a espessura do cobrimento, garante-se um melhor desempenho dessas estruturas, principalmente quanto à corrosão das armaduras. Percebe-se, ainda, que a ETE J, na qual o f_{ck} e o cobrimento eram maiores,



FIGURA 5

CORROSÃO DA ARMADURA: (A) NA LAJE DO POÇO DE SUÇÃO; (B) NAS CAIXAS DE INSPEÇÃO DO TANQUE DE LODOS DA ETE H; E (C) NO CANAL DA GRADE DA ETE P



FIGURA 6

CORROSÃO DO CONCRETO: (A) NO CANAL DA GRADE APÓS O POÇO DE SUÇÃO DA ETE H E NO TANQUE DE CONTATO DA ETE B; (B) NO LOCAL PRÓXIMO A CHEGADA DO EFLUENTE; E (C) NA FACE INFERIOR DA LAJE DE COBERTURA

houve a menor incidência de manifestações patológicas e, também, uma menor corrosão, tanto da armadura como do concreto. As Figuras 4 e 5 ilustram os locais deteriorados pela corrosão das armaduras. Bohn *et al.* (1993 *apud* CHERNICHARO *et al.*, 2010) mostraram que os maiores níveis de concentração de H_2S em uma estação de tratamento de esgotos sanitários se encontram nos poços de sucção (Estação Elevatória de Esgotos) e nas unidades de pré-tratamento. Em estudo específico, os referidos autores mediram valores iguais a $4,8 \text{ mg/m}^3$ e $3,5 \text{ mg/m}^3$, respectivamente para a estação elevatória de esgoto e para as unidades de pré-tratamento.

A corrosão química do concreto basicamente ocorre em meio aos mesmos agentes que causam a corrosão da armadura. O gás sulfídrico presente no esgoto ou oriundo de produtos químicos destinados à desinfecção e os ácidos oriundos de produtos metabólicos da atividade microbiana, combinados, atacam a pasta de cimento e iniciam o processo de degradação do concreto. As soluções ácidas dissolvem a portlandita, os silicatos e os aluminatos hidratados da matriz cimentícia. Quando esses ácidos reagem formando sais, um desses sais pode ser à base de sulfato. Havendo a liberação de íons sulfato, estes atacam a pasta de cimento, gerando lentamente produtos expansivos como a etringita, a taumasita e a gipsita (SHIRAKAWA, 1994; COSTA, 2004; SOUZA, 2006). A erosão, a biodeterioração e a corrosão são processos de deterioração

do concreto que ocorrem simultaneamente e estão sempre associados, um influenciando o outro. A Figura 6 ilustra a corrosão do concreto no canal da grade e também no tanque de contato da ETE B, onde são adicionados produtos químicos à base de cloretos para desinfecção dos esgotos.

Kim e Lee (2009) observaram que locais onde há variação do nível de esgoto estão sujeitos a uma maior deterioração do que locais totalmente submersos, e isso também foi confirmado por Bond *et al.* (2014), quando compararam amostras expostas somente à ação de gases e outras parcialmente submersas. No presente estudo foi possível confirmar essas afirmações, já que muitas patologias do concreto foram detectadas em locais onde há variação do nível de esgotos (como se vê na Figura 6(a)).

4. CONCLUSÕES

A idade da estação não apresentou grande influência no nível de deterioração, exceto nas ETEs tipo Reator UASB + BF + DS, em que a estação mais antiga apresentou maior incidência de deterioração.

Os tipos de estrutura de concreto ocasionam manifestações patológicas mais características como erosão no tratamento preliminar, corrosão das armaduras nos poços de sucção e corrosão do concreto nos tanques de contato.

A biodeterioração foi a manifestação patológica mais intensa e apareceu em todas as unidades e tipos de tratamento, devido ao fato de a ETE proporcionar

um microclima favorável ao desenvolvimento de microorganismos.

O tipo de tratamento de esgoto pode influenciar na intensidade das manifestações patológicas no concreto, porém é necessário considerar vários outros fatores que também podem contribuir para a deterioração das estruturas, tais como a vazão, a idade da ETE, características do esgoto e do concreto.

Concretos com f_{ck} e cobrimentos mais elevados apresentaram menor incidência de deterioração; desta verificação, depreende-se que esses e outros parâmetros prescritivos do concreto e da estrutura voltados à durabilidade devem ser criteriosamente especificados, ao nível do projeto, assim como colocados em prática na especificação e dosagem do concreto, e na execução da estrutura. Além disso, avanços em termos de uma abordagem baseada no desempenho devem ocorrer para que, de fato, possa ser garantida a vida útil dessas estruturas em face da agressividade típica dos ambientes de ETEs.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pelo suporte à pesquisa por meio de bolsas PQ e ao apoio para participação no evento.

Em especial, ao Mildy, Luanna, Fausto e Fernanda, bem como aos operadores das estações de tratamento de esgoto. ©

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118: 2014 – Projeto de estruturas de concreto. ABNT: Rio de Janeiro, abr. 2014. 238 p.
- [2] _____. NBR 12655: 2015 – Preparo, controle e recebimento de concreto. ABNT: Rio de Janeiro, jan. 2015. 23 p.
- [3] ACI. American Concrete Institute. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (318R-05) – ACI Committee 318 (2008). American Concrete Institute: Farmington Hills, MI.
- [4] BOHN, H. L. Bioprocessing of organic gases in waste air. Symposium on Bioremediation and Bioprocessing. In: 205th NATIONAL MEETING OF AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. Proceedings... Denver: ACS, 1993. p. 287-289.
- [5] BOND, P. L.; KELLER, J.; JIANG, G. Determining the long-term effects of H₂S concentration, relative humidity and air temperature on concrete sewer corrosion water. Cement and Concrete Research, 65 (2014), p. 157 -169.
- [6] BS. British Standards. BS 8500-1: 2006 – Concrete: Complementary British Standard to BS EN 206-1 – Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier. British Standard, 389, Chiswick High Road, London W4 4AL.
- [7] CASCUDO, O. A era dos concretos duráveis – Concepção estrutural e especificação do concreto com base no desempenho. Revista Construir Mais, SINDUSCON-GO, Goiânia, p. 12 – 12, 04 dez. 2015.
- [8] CASCUDO, O. Avaliação da estrutura de concreto do Estádio Serra Dourada contendo análise da estabilidade estrutural. Goiânia: Escola de Engenharia Civil e Ambiental da UFG, 2009. \Relatório Técnico\.
- [9] CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [10] CHERNICHARO, C. A. L.; STUETZ, R. M.; SOUZA, C. L.; MELO, G. C. B. Alternativas para o controle de emissões odorantes em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.15, n.3, p. 229-236. 2010.
- [11] COSTA, R. M. Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- [12] EN 206-1. European Standard – Concrete: Part I: Specification, performance, production and conformity. EN 206-1: 2000. European Committee for Standardisation.
- [13] GAYLARDE, C. C. E; GAYLARDE, P. M. Biodeterioration of historic buildings in Latin America. Department of biophysics and MIRCEN: DBMC. UFRGS: 2002.
- [14] GIANNANTONIO, D. J.; KURTH, J. C.; KURTIS, K. E.; SOBECKY, P. A. Effects of concrete properties and nutrients on fungal colonization and fouling. International Biodeterioration & Biodegradation, 63 (2009) 252-259.
- [15] GU, J.; FORDB, T. E.; BERKEC, N. S.; MITCHELL, R. Biodeterioration of concrete by the fungus Fusariuml. Elsevier Science, 1998.
- [16] KIM, S.; LEE, S. Microstructural observations on the deterioration of concrete structure for sewage water treatment. KSCE Journal of Civil Engineering, (2010) 14(5):753-758.
- [17] MORADIAN, M.; SHEKARCHI, M.; PARGAR, F.; VALIPOUR, M. Deterioration of concrete caused by complex attack in sewage treatment plant environment. Journal of Performance of Constructed Facilities (American Society of Civil Engineers). Feb. 2012, 26(1): 124-134.
- [18] NICA, D.; DAVIS, J. L.; KIRBY, L.; ZUO, G.; ROBERTS, D. J. Isolation and characterization of microorganisms involved in the biodeterioration of concrete in sewers. International Biodeterioration & Biodegradation (2000).
- [19] PEREIRA, H. W. B. Identificação das condições gerais de conservação nos reservatórios integrantes do sistema de abastecimento de água de Natal. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- [20] SANTOS, E. M. B. Avaliação experimental do comportamento de fratura e de erosão de concreto refratário antierosivo. 2012. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de Lorena. USP, 2012.
- [21] SAWYER, C. N.; MCCARTY, P.L.; PARKIN, G. F. Chemistry for environmental engineering and science. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 768 p.
- [22] SHIRAKAWA, M. A. Estudo da biodeterioração do concreto por Thiobacillus. 1994. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Autarquia Associada à Universidade de São Paulo), São Paulo, 1994.
- [23] SILVA, A. B. Avaliação da produção de odor na estação de tratamento de esgotos Paranoá e seus problemas associados. 2007. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2007. 111p.
- [24] SOUZA, R. B. Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – Método de ensaio acelerado. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2006.
- [25] SPERLING, M. V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Princípios do Tratamento Biológico de águas Residuárias. v. 1. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.
- [26] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Odor and corrosion control in sanitary sewerage systems and treatment plants. Washington DC: EPA-625/1-85/018, 1985. 132 p. \Design Manual\.