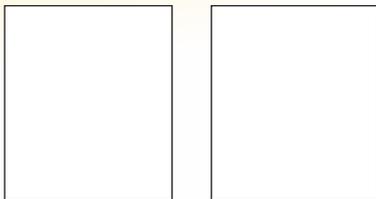


Concrete structures erosions of urban stormwater channels

Erosões nas estruturas de concreto das galerias de águas pluviais urbanas



J. E. DE AGUIAR ^a
aguiar@recuperacao.com.br

M. B. BAPTISTA ^b
marcio.baptista@ehr.ufmg.br

Abstract

This work shows the consequences of the emergence of erosions on concrete structures of urban stormwater channels, based on inspections in over 180 km of channels in the drainage system in Belo Horizonte (Brazil). The article describes the origins of erosion, which can be abrasion, cavitation and chemical attacks, and shows the formation and evolution processes of pathologies, stressing the fact that they can cause the structures to collapse. Safety inspection procedures and the high risks involved are presented. The article also addresses the main characteristics materials should have to be erosion resistant, and establishes relationships between the different pathologies and the operational hydraulic characteristics of the channels, aiming at the future development of a patrimonial management program.

Keywords: Stormwater channels, concrete pathologies, erosions.

Resumo

Este trabalho apresenta as conseqüências do surgimento das erosões no interior das estruturas de concreto das galerias de águas pluviais urbanas, com base em inspeções feita em mais de 180 km na rede de drenagem da cidade de Belo Horizonte (Brasil). O artigo descreve a gênese das erosões que podem ser por abrasão, por cavitação e por ataque químico, mostrando os processos de formação e evolução das patologias, chamando a atenção que elas podem levar as estruturas ao colapso. São apresentados os procedimentos de segurança para a realização das inspeções e os altos riscos envolvidos no trabalho. O artigo também aborda as principais características que os materiais devem ter para resistir às erosões e procura estabelecer relações entre as diferentes patologias e as características hidráulicas operacionais, visando o desenvolvimento ulterior de um programa de gestão patrimonial.

Palavras-chave: Galerias de águas, patologias de concreto, erosões.

^a Engenheiro Civil, M.Sc., Recuperação Engenharia – Rua Lindolfo de Azevedo, 611 – 30421-265 Belo Horizonte, Brasil – e-mail aguiar@recuperacao.com.br tel: (31) 3296-6300

^b Engenheiro Civil, Dr. Escola de Engenharia da UFMG – Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – Av. Antonio Carlos, 6627 - Belo Horizonte, Brasil – e-mail marcio.baptista@ehr.ufmg.br tel: (31) 3409-4081

1. Introdução

Os sistemas clássicos de drenagem urbana, baseados na lógica da evacuação rápida das águas do meio urbano através de ações estruturais, implicam em investimentos maciços das municipalidades, face à necessidade de contínua adaptação à expansão urbana.

Com o passar dos anos, as estruturas de concreto das galerias de águas pluviais utilizadas nos sistemas de macrodrenagem urbana sofrem um desgaste gradual pelo escoamento das águas, que, normalmente, possuem sedimentos sólidos, esgotos clandestinos e contaminações químicas oriundas de efluentes industriais. Os desgastes refletem em prejuízos econômicos relevantes, pois, por um lado, representam a degradação do significativo capital nelas investido e, por outro lado, implicam em intervenções de manutenção, na maior parte das vezes, em caráter emergencial.

Neste sentido, o trabalho abordou a situação das galerias de águas pluviais de concreto a partir de diversas inspeções, em mais de 180 km de comprimento de redes de galerias de águas pluviais da cidade de Belo Horizonte (MG), quando da realização do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Belo Horizonte (PDDBH). A partir das inspeções foram correlacionados os desgastes verificados com os mecanismos hidráulicos e as características dos concretos que compõem estas redes.

Os estudos envolvendo as patologias em galerias de águas pluviais, particularmente as erosões, são escassos na literatura nacional e internacional. O maior problema refere-se ao elevado grau de dificuldade para se obter essas informações, uma vez que exige incursões no interior das galerias, trabalho em ambiente confinado, que requer diversos procedimentos de segurança em função dos altos riscos envolvidos devido à presença de gases tóxicos, pontas de ferros salientes, grandes cavidades, obstruções, etc.

De maneira geral, os desgastes superficiais das galerias de águas pluviais são definidos como a perda, normalmente lenta, de seção do material a partir das superfícies expostas aos fenômenos de deterioração, podendo afetar a espessura total do elemento estrutural. Segundo Graham *et al.* [9], os desgastes superficiais podem ocorrer de várias maneiras, sendo que a principal forma é a erosão, podendo ela ser por abrasão, cavitação e ataques químicos, podendo atuar de forma isolada ou em conjunto.

2. Procedimentos de Segurança para a Realização das Inspeções

Para a realização das vistorias nas galerias de águas pluviais urbanas em pleno funcionamento, sem desviar os fluxos de água, é preciso executar diversos procedimentos de segurança, pois se tratam de ambientes confinados, com presença de gases orgânicos, algumas vezes tóxicos, pontas de ferro expostas principalmente na laje de piso, buracos profundos, obstruções, etc.

Conforme descrito por Aguiar e Baptista [2], os principais procedimentos adotados nas inspeções que visam garantir a segurança e integridade física dos inspetores são:

- Os investigadores deverão estar clinicamente aptos para a realização dos serviços, sendo permitida somente a entrada de pessoas treinadas e certificadas para trabalhos em ambientes confinados (NBR 14787), vacinadas contra tétano, hepatite A e B;
- A equipe deverá ser a menor possível, recomendando-se a

Figura 1 – Vestimenta e demais aparatos de segurança utilizados nas inspeções das galerias de águas pluviais



entrada na galeria de no máximo quatro pessoas por equipe de inspeção. Duas seguem à frente, com a finalidade principal de garantir a integridade física dos inspetores, chamada de equipe de segurança, carregando um bastão metálico para testar constantemente a qualidade e resistência do piso da galeria, uma vez que é comum encontrar enormes buracos, encobertos pela água, com profundidades ultrapassando a 3,0 m. As anotações das observações, medições e fotografias devem ser feitas somente pelos dois inspetores que vem logo a seguir à equipe de segurança;

- Uma das pessoas pertencentes à equipe de segurança deve portar um aparelho detector de gases orgânicos e tóxicos, com sinalização sonora de alerta caso a contaminação no interior das galerias ultrapasse os níveis de segurança recomendados. O aparelho detector de gases deverá estar devidamente calibrado. Os gases que podem ser encontrados no ambiente confinado das galerias de águas pluviais são o gás sulfídrico, monóxido de carbono, gases combustíveis e oxigênio;
- Todos os participantes da inspeção devem portar macacão sanitário, botas de borracha (preferencialmente até a virilha), máscara de filtro combinado para gases tóxicos e partículas suspensas, luvas de PVC e lanternas, conforme mostrado na Figura 1;
- A entrada na galeria é feita através de escadas colocadas convenientemente nos poços de visita ou grelhas, abertos previamente para ventilação, devidamente isolados do tráfego por cones e fitas zebraadas. Caso necessário, deve-se introduzir um sistema de ventilação forçada no interior da galeria;
- O sentido da vistoria será sempre de montante para jusante, acompanhando o sentido do fluxo da água, que empurra e dobra para frente as pontas de ferro salientes, facilitando o pisar sobre as ferragens expostas, evitando furar as botas e os pés dos inspetores;
- Os trabalhos feitos no interior das galerias são coordenados por uma equipe de apoio, que acompanha e monitora as atividades pelas ruas, tendo uma preocupação muito grande com

o clima, uma vez que os trabalhos só podem ser realizados com tempo bom, nunca em dias nublados ou chuvosos. As cabeceiras das galerias devem ser monitoradas também, pois, muitas vezes, elas estão localizadas longe do ponto de inspeção e uma chuva na montante, caso passe despercebida, pode ser fatal para os inspetores;

- Deve ser executado um plano de resgate de emergência, contando para isto com o apoio do Corpo de Bombeiros Militar.

3. Deterioração por abrasão

3.1 Mecanismos de degradação pela abrasão

De maneira geral, os desgastes superficiais das estruturas hidráulicas de concreto são definidos como a perda, normalmente lenta, de seção do material a partir das superfícies expostas aos fenômenos de deterioração, podendo afetar a espessura total do elemento estrutural.

Na literatura, autores diferentes empregam termos diferentes para designar essas manifestações patológicas. Mehta e Monteiro (2008) e Neville (1997) consideram que os desgastes por abrasão ocorrem devido ao atrito seco nas superfícies, enquanto as erosões são provocadas pelo choque de partículas sólidas suspensas em líquidos. Outros autores divergem deste conceito, como Graham *et al.* (2000) e Kormann (2001), que consideram a abrasão como processo erosivo em estruturas hidráulicas de concreto. Os autores deste trabalho consideram que o desgaste ocorrido em superfícies hidráulicas de concreto deve ser tratado como erosão por abrasão ou simplesmente abrasão.

A erosão do concreto por abrasão geralmente ocorre devido ao carreamento pela água de partículas sólidas (materiais abrasivos) como argila, areia, cascalhos etc. Os materiais abrasivos são aqueles que, por serem mais duros, são capazes de arrancar por fricção as partículas de outros corpos, segundo Leonardo [12]. Os detritos transportados pelos fluxos d'água variam desde seus

Figura 2 - Aspecto polido da laje de piso da galeria do Córrego da Serra devido ao processo de abrasão



Figura 3 - Forte deterioração causada pela erosão por abrasão na galeria da Av. Prudente de Morais



tipos até suas durezas, podendo ser areias, pedras, escombros, cascalhos, restos vegetais, etc.

A aparência das superfícies das estruturas hidráulicas que sofrem erosão por abrasão é normalmente lisa e polida, conforme mostrado na figura 2. Segundo Kormann [11], esta aparência é facilmente diferenciada da superfície de concreto que sofreu cavitação, pois esta apresenta buracos ou cavidades.

Conforme MacInnis [13], a erosão causada ao concreto pela ação abrasiva de materiais no escoamento pode ser tão severa quanto a erosão por cavitação, mas, geralmente, não causa danos tão catastróficos.

A taxa de desgaste ou profundidade de ataque é dependente de alguns fatores, tais como tamanho, forma, dureza, quantidade de partículas sendo transportada no leito do fluxo, velocidade da água e qualidade do concreto, segundo Mehta e Monteiro, [15].

De acordo com Aguiar [1], o escoamento laminar de água sem a presença de partículas sólidas em suspensão, em geral, não danifica o concreto, mas a erosão provocada por partículas grossas, como areia ou brita, pode ser tão severa como a cavitação, que tende a aumentar com a perda da camada superficial, que, normalmente, é mais resistente que as camadas inferiores. As causas prováveis desta deterioração são a presença de partículas sólidas abrasivas, a baixa resistência do concreto, o uso de agregados inadequados e o acabamento deficiente do concreto.

Conforme citado por Leonardo [12], a resistência à abrasão é uma característica importante nas superfícies sujeitas a movimentação de cargas. A destruição da estrutura do material se processa pelo rompimento dos agregados ou pelo seu arrancamento. A utilização de agregados mais duros e de maior tamanho melhora a qualidade da pasta de cimento e contribuem na redução do desgaste. Quanto mais turbulentos forem os fluxos, juntamente com as forças de impacto ocasionadas pelos detritos, mais abrangente será a erosão por abrasão, conforme mostrado na figura 3.

De modo geral, a resistência à abrasão do concreto cresce proporcionalmente com a resistência à compressão, e, por causa disto, ela depende muito do tipo, da granulometria dos materiais e da co-

Figura 4 - Armaduras expostas por causa da erosão provocam a retenção de lixo, reduzindo a velocidade do escoamento no Córrego das Piteiras



esão do concreto. Em superfícies de concreto sujeitas à abrasão, o consumo mínimo de cimento deve ser de 350 kg/m^3 , segundo Leonardo [12].

Normalmente as pastas de cimento endurecidas não possuem alta resistência ao atrito e ao desgaste à abrasão. A vida útil do concreto pode ser diminuída sob condições de ciclos repetidos de atrito, principalmente quando a pasta de cimento possui alta porosidade, baixa resistência, e for inadequadamente protegida por agregados que não possuem resistência ao desgaste superficial, de acordo com Mehta e Monteiro [15].

Logo, quanto maior a resistência, menor a permeabilidade e a porosidade de um concreto, menor será o desgaste superficial causado por abrasão. Conforme Kormann [10], a resistência dos concretos ao desgaste por abrasão é regida por vários fatores: a dosagem, a natureza do aglomerante, a relação água/cimento, as características do agregado graúdo (natureza petrográfica, resistência à abrasão e à compressão, dimensão máxima, granulometria, dosagem), e ainda pela aderência entre os agregados e a pasta de cimento. Interferem também na questão as características do concreto no estado fresco, ou seja, a segregação, a exsudação, o abatimento, o teor de ar incorporado, a compactação, a cura, o acabamento ou tratamento superficial, conforme comenta Almeida [4].

A erosão por abrasão atinge principalmente a laje de piso e a parte inferior das paredes das galerias, por causa do carregamento constante de partículas sólidas em suspensão. Depois da inspeção em mais de 180 km de galerias de águas pluviais na cidade de Belo Horizonte, observou-se que existe uma forte correlação entre o nível do desgaste do concreto do piso e das bases das paredes com a qualidade do material empregado na construção, o tipo de sedimentos transportados e o tempo de exposição, sendo um processo claramente observado na maioria das galerias de águas pluviais inspecionadas. Notadamente os processos erosivos mais severos foram observados na bacia do Ribeirão Arrudas, por causa das partículas de minério de ferro oriundas da Serra do Curral,

grande maciço deste mineral que circunda a cidade em sua parte sul, que, por serem muito abrasivas, deixam as superfícies polidas, com exposição dos agregados graúdos.

As erosões por abrasão contribuem lentamente e de forma decisiva na degradação das estruturas de concreto, pois causam a redução de espessura dos pisos e das paredes das estruturas de concreto.

A perda da camada superior de concreto do piso, além de comprometer a parte estrutural das galerias, interfere também no seu comportamento hidráulico, uma vez que as armaduras da laje ficam expostas e salientes acima da linha de água, causando a retenção de lixos e escombros, reduzindo a velocidade dos fluxos de água conforme visto na figura 4.

3.2 Características dos materiais resistentes à abrasão

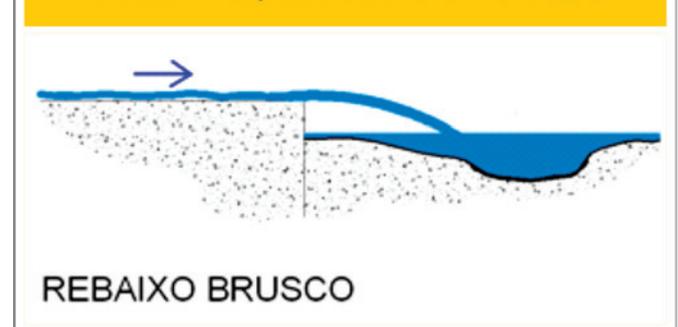
As superfícies submetidas ao desgaste à abrasão exigem da engenharia inovações tecnológicas e materiais com melhor resistência ao desgaste superficial, sendo recomendado o concreto de alto desempenho, que é mais promissor em termos de garantia de uma vida útil ampliada, com maiores resistências mecânicas e químicas. A resistência à abrasão deve ser encarada como um fator crítico do projeto nas estruturas hidráulicas de concreto, segundo Aitcin [3].

O acabamento superficial e o regime de cura afetam muito mais a resistência à abrasão do que a resistência à compressão dos concretos. As ligações da pasta de cimento à areia e ao agregado graúdo são fundamentais para conferir ao concreto boa resistência à erosão por abrasão. A resistência à abrasão do concreto é relacionada com a dureza do agregado graúdo, logo, depende do tipo de agregado utilizado na sua composição, conforme Leonardo [12].

Em termos de agregado graúdo, sabe-se que este é o componente do concreto que protege a argamassa, geralmente menos resistente ao desgaste. Em concretos com resistência à compressão superior a $42,0 \text{ MPa}$, entretanto, parece que a influência dos agregados na resistência à abrasão é pequena, conforme citado por Almeida [4].

Segundo Graham *et al.* [9], um concreto resistente à abrasão deve ser dosado com agregados de alta dureza, sendo que um concreto feito com brita de granito tem o dobro da resistência quando comparado a um concreto feito com pedras calcárias.

Figura 5 - Erosão por cavitação após o rebaixo brusco - Adaptado de Graham et al., (9)



4. Deterioração por cavitação

4.1 Mecanismos de degradação pela cavitação

Na Engenharia Hidráulica a cavitação é tida como um fenômeno dos mais complexos, seja pelo seu entendimento, seja pelos diversos parâmetros que a influenciam, seja pela grande dificuldade de fazer sua simulação em laboratório, segundo Kormann [10].

As estruturas hidráulicas estão sujeitas a ação de diversos mecanismos que podem colocá-las em situação de risco, sendo a cavitação particularmente importante, requerendo que as estruturas de concreto tenham superfícies resistentes. Quando aparece o dano na estrutura provocado pela cavitação, a área danificada se transforma numa nova fonte de cavitação, criando outra danificada a jusante, com danos ainda maiores, segundo Dalfré [7].

O dano devido à cavitação sempre ocorre a jusante da fonte que o provocou. Dentre as fontes estão as irregularidades superficiais e as mudanças bruscas na direção do escoamento, particularmente os degraus nas galerias de águas pluviais.

A figura 5 ilustra a formação da cavitação na região dos degraus, denominada por rebaixo brusco por Graham *et al.* [9].

Figura 6 – Efeitos da cavitação em estrutura hidráulica de concreto MacInnis *et al.*, (13)



Pode-se afirmar que a cavitação é a formação de bolhas de vapor provocadas pelo abaixamento de pressão em regiões onde há um aumento elevado na velocidade de escoamento. A elevação da velocidade local é ocasionada por sobressaltos existentes na superfície de escoamento, havendo queda de pressão a valores próximos aos da pressão de vapor, formando-se as bolhas, segundo Kormann [11].

Segundo Neville [16], a principal característica do fenômeno é a instabilidade das bolhas, visto que, quando são transportadas pelo fluxo para regiões de pressões mais elevadas, elas colapsam ou implodem repentinamente. A água preenche rapidamente os pequenos vazios e pressões altíssimas são atingidas em áreas infinitesimais e em intervalos de tempo extremamente

pequenos. Com a repetição deste fenômeno nas mesmas partes do concreto, resultam as escarificações.

Os danos podem se desenvolver muito rapidamente depois de iniciado o processo. Em muitos casos, a simples substituição do concreto erodido não garante o bom desempenho em longo prazo, necessitando de técnicas de reparo mais aprimoradas, que envolvem a utilização de concretos mais resistentes e tratamentos superficiais mais adequados.

Figura 7 – Galeria da Av. Mendes Sá foi construída com degraus para reduzir a velocidade do fluxo



Figura 8 – Área com erosão por cavitação logo após uma região com degraus na galeria da Rua Piauí



Figura 9 - A cavitação provocou a abertura de uma enorme cratera na galeria do Córrego da Serra



Quando as bolhas colapsam, a pressão chega a atingir valores da ordem de 108,0 atm, segundo Borsari [5] (Tullis -1979 cita em torno de 69,0 GPa). E quanto menores as bolhas e maiores suas quantidades, maior será o problema de deterioração. A cavitação pode ocorrer tanto em dutos fechados como em canais abertos; neste último caso, mesmo em velocidades baixas, em torno de 7,0 m/s, segundo Mehta e Monteiro [15].

Como a cavitação não ocorre uniformemente, a aparência da superfície que sofreu erosão por cavitação é irregular, riscada e perfurada, conforme figura 6, aspecto oposto das superfícies que sofreram abrasão, conforme comenta Neville [16].

Segundo Kormann [11], as microfissuras na superfície do concreto, bem como entre a argamassa e os agregados, contribuem para

Figura 10 - Cratera com profundidade superior a um metro, logo após um degrau na galeria da Rua Trifana



que os danos provocados pela cavitação sejam maiores ainda. Na região microfissurada do concreto, ondas compressivas de água podem causar tensões de tração que propagam as microfissuras já existentes. A repetição do esforço causado pelas ondas pode fazer com que o material se deteriore e pedaços do mesmo se descolam, criando ressaltos na superfície. Borsari [5] explica que a erosão por cavitação tende a desgastar a argamassa, promovendo o descolamento dos agregados. E ocorrido o desgaste pela cavitação, ele só tende a aumentar a intensidade do fenômeno, pois com a deterioração da argamassa, os agregados ficam expostos, formando novas irregularidades, favorecendo o fenômeno cavitante.

A erosão por cavitação é um mecanismo de desgaste muito abordado na literatura, principalmente nas obras hidráulicas de barragem, mas pouco, ou quase nada, citada nas galerias de águas pluviais. Nas vistorias feitas nas diversas galerias de Belo Horizonte observou-se que existe uma forte correlação entre as erosões por cavitação e as declividades da laje de piso, particularmente as mais acentuadas, acima de 5%, por que nestes casos, geralmente, existem degraus, com espelho variando entre 0,5 a 1,0 metro de altura, criados para conformar o perfil do canal e reduzir a velocidade do escoamento, conforme mostrado na Figura 7. Na região sul de Belo Horizonte, perto da Serra do Curral, é comum encontrar declividades acima de 15%, enquanto na região norte, perto da Pampulha, elas não passam de 5%, razão pela qual os maiores problemas com a erosão por cavitação estão localizados na primeira região.

Os degraus, ou rebaixos bruscos, são os responsáveis pelo surgimento das erosões por cavitação. A figura 8 comprova, na prática, a existência desta erosão logo após os degraus, quando a galeria da Rua Piauí foi ensecada para ser recuperada pela Prefeitura de Belo Horizonte.

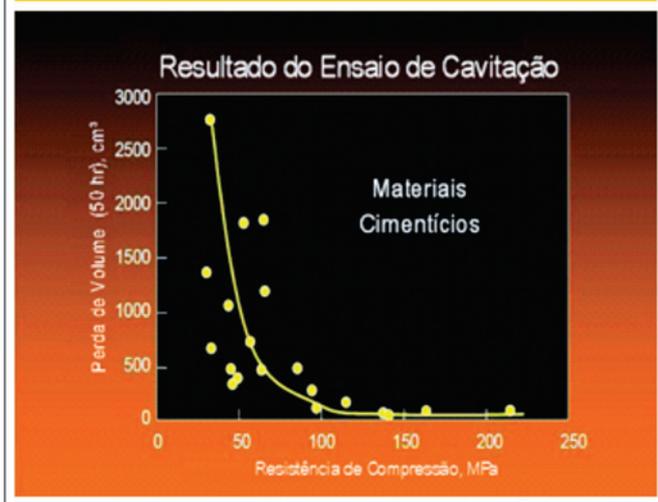
Cavidades logo após os rebaixos bruscos foram observadas em muitas galerias de Belo Horizonte que foram executadas com degraus. As cavidades variam de tamanho e profundidade, sendo encontradas enormes crateras, conforme mostrado nas figuras 9 e 10, com grande risco de colapso da estrutura, requerendo intervenções urgentes para restabelecer a estabilidade do local, uma vez que, ao colapsar, a galeria pode levar consigo edificações, veículos e pessoas que estão ao seu redor.

As inspeções feitas na rede de drenagem de Belo Horizonte mostraram que os danos causados pela erosão por cavitação são severos, muito mais que as erosões por abrasão, principalmente na região sul da cidade, a parte mais alta do município. Este mecanismo de desgaste é recorrente após os degraus na maioria das galerias, mas não ocorre necessariamente em todos os ressaltos, pois depende do perfil do canal, da qualidade do material empregado e do tempo de construção da obra. Uma vez instaurado o processo de desgaste, observa-se que ele é progressivo, tanto a jusante, como a montante do ponto inicial de cavitação.

4.2 Características dos materiais resistentes à cavitação

Frente ao avanço que houve nos estudos da cavitação nas últimas décadas, particularmente nas grandes estruturas hidráulicas, elas podem ser projetadas para serem mais resistentes aos efeitos da cavitação. Para tal, é necessário que o projeto hidráulico seja ausente de curvaturas abruptas e rebaixos bruscos, e o acabamento

Figura 11 – Perda de volume versus resistência a compressão (Adaptado de McDonald [14])



da superfície do concreto seja muito resistente, liso, alinhado, sem defeitos como saliências e depressões, conforme cita Neville [16]. Segundo Quintela e Ramos [17], as propriedades dos materiais que melhor definem a resistência à cavitação são a resistência à tração, ao impacto, à compressão e ao cisalhamento, sendo que a escolha dos materiais, que podem estar sujeitos à cavitação, deve seguir a seguinte ordem: coeficiente de elasticidade na ruptura, dureza, tensão de ruptura, tensão de escoamento e energia de deformação do material.

Dalfré [7], em seu trabalho de desenvolvimento de equipamentos para avaliação da erosão por cavitação, concluiu que a resistência à erosão é determinada pela adesão do aglomerante aos inertes e pela própria coesão do aglomerante, devendo também ser considerado a homogeneidade da estrutura do concreto, a utilização de inertes ativos do ponto de vista de adesão e os processos de lançamento do concreto. Recomenda o uso de concretos de alto desempenho, ou seja, aqueles com baixo fator água/cimento e superfluidificantes. Os agregados devem ser de no máximo 38 mm de diâmetro, duros, densos e com excelente ligação entre a pasta e os agregados.

Segundo Almeida [4], o fortalecimento da ligação entre os agregados e a pasta de cimento é primordial para a elevação da resistência do concreto, já que esta é a parte mais fraca da microestrutura do material.

Outra composição utilizada, segundo Dalfré [7], estudando o desgaste ocasionado por sólidos nas superfícies das estruturas hidráulicas de concreto, é o concreto com fibras e a conjugação de concreto com fibras, polímeros e micro-sílica, menos as fibras metálicas, que podem, inclusive, serem fontes de danos.

McDonald [14] realizou uma importante pesquisa de avaliação de materiais para reparos de erosão de estruturas hidráulicas. O autor cita que a metade das 600 estruturas hidráulicas pertencentes, ou operadas, pelos U.S. Army Corps of Engineers tem sérios problemas de erosão, divididos igualmente entre a cavitação e abrasão. Vários materiais estão sendo testados para serem utilizados nos reparos, como materiais de base de cimento Portland, cerâ-

mica com epóxi, metais, fibras reforçadas com epóxi, poliuretano, etc, obtendo diferentes graus de sucesso, sendo que os piores resultados referem-se aos produtos a base de cimento Portland. No testes laboratoriais feitos por McDonald [14] observou-se a grande correlação entre a perda de volume e a resistência à compressão do concreto testado. Um aumento na resistência do concreto entre 35 MPa e 70 MPa resultou em um significativo aumento da resistência a cavitação, sendo que resistências maiores que estas pouco acrescentaram, conforme mostrado na figura 11. Ainda referente à pesquisa feita por McDonald [14], dentro do “High Performance Materials and Systems Research Program” (US Army Corps of Engineers), a resistência à cavitação do concreto convencional pode ser incrementada com a adição de micro-sílica e a redução do fator água/cimento, sendo que o aumento é atribuído à maior compactidade e resistência à compressão do concreto. A adição de látex também aumentou a resistência à cavitação no concreto convencional, com redução de 40% da perda de massa devido ao aumento da aderência da pasta de cimento aos agregados.

Foram feitos também, dentro da pesquisa citada acima, testes com fibras de aço e sintéticas (nylon e poliuretano) adicionadas ao concreto convencional, que, dentro do esperado, aumentaram a resistência à cavitação à medida que o concreto tinha maior resistência à compressão, mas não houve diferença significativa no desempenho das fibras de aço ou sintéticas. Contudo, a maior surpresa dos testes foi que, para um dado fator água/cimento, a adição de fibras não resultou em nenhum incremento na resistência à cavitação.

Uma das mais notáveis inovações na área das construções hidráulicas visando combater os efeitos da cavitação é a aeração das correntes líquidas, quando esta é provocada por irregularidades na superfície. Nos escoamentos com superfície livre, a introdução de ar pode fazer-se naturalmente através da superfície livre ou mediante dispositivos de arejamento (aeradores).

A introdução do ar nos escoamentos torna o meio ar-água compressível e elástico, capaz de absorver os impactos das ondas de pressão que se formam em consequência do colapso das bolhas de cavitação, eliminando ou reduzindo de forma significativa a erosão por cavitação. Estes dispositivos consistem em ranhuras, rebaixos e defletores, sendo que, em certos casos, há a necessidade de recorrer a poços de aeração para assegurar o transporte de ar desde o exterior para os aeradores, segundo Dalfré [7]. Estes procedimentos podem ter aplicação em grandes estruturas hidráulicas, como as barragens, mas dificilmente serão adotados nas galerias de água pluviais em função das características construtivas, principalmente por causa da extensão das obras.

5. Deterioração por ataque químico

5.1 Mecanismos de degradação por ataque químico

Erosão por ataques químicos é outra causa importante de deterioração das galerias de águas pluviais. As estruturas podem ter alterações na composição de sua massa, pois os produtos resultantes da hidratação do cimento são susceptíveis às reações que podem ser provocadas pela presença da água e por elementos contidos nesta, como comenta Neville [16]. A água pode agir como

solvente dos diversos compostos do cimento Portland endurecido e de agentes agressivos do meio. Se a água contiver ácidos e sais reagentes dissolvidos em seu meio, os efeitos erosivos podem ser ainda piores.

Quando ocorre a decomposição dos elementos resultantes da hidratação do cimento e formação de outros compostos, e estes forem solúveis, poderão ser lixiviados ou não. Se estes compostos não forem carregados, poderão expandir-se no mesmo local onde foram formados, causando tensões localizadas, segundo Kormann [11].

Águas contendo restos de vegetais (turfa) e de certos minerais em decomposição apresentam-se ácidas e, portanto, agressivas às superfícies das estruturas de concreto. Quanto menores forem as dimensões da estrutura, mais acentuados serão os desgastes, enquanto os danos nas estruturas maiores poderão não ser tão significativos.

Devido ao elevado pH do concreto, raramente microorganismos conseguem desenvolver-se nas estruturas. Porém, em regiões tropicais, alguns tipos de algas, fungos e bactérias fixam-se nas superfícies de concreto e utilizam o nitrogênio do ar como fonte de energia. Assim sendo, com o metabolismo destes, há formação de ácido nítrico, que é agressivo ao concreto, de acordo com Neville [16].

Os fatores determinantes para que ocorram ataques químicos no concreto das estruturas hidráulicas são os elementos resultantes da hidratação do cimento, vulneráveis à presença de água e compostos agressivos dissolvidos, temperatura, umidade e condições do meio no qual as estruturas estiverem inseridas.

Os compostos resultantes da hidratação do cimento mais vulneráveis às reações são o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). Se o concreto contiver agregados calcários, estes também poderão sofrer alterações químicas deletérias, segundo Neville [16].

O pH da água também é responsável pela agressividade às estruturas de concreto. Mehta e Monteiro [15] afirmam que qualquer meio com pH abaixo de 12,5 pode ser agressivo à pasta de cimento endurecida. Assim, toda água seria nociva ao concreto, porém, o grau de agressividade está diretamente relacionado com a sua permeabilidade. Águas com pH maior que 6 podem ser consideradas inofensivas se o concreto possuir pouca permeabilidade, de acordo com Kormann [10].

Quanto a este aspecto, Neville [16] explica que, se o pH da água estiver entre 5,5 e 6,5 o ataque aos compostos resultantes da hidratação será brando, abaixo de 5,5 será severo, e se estiver abaixo de 4,5 será muito danoso às estruturas de concreto. Águas correntes com pH abaixo de 6,5 lixiviam o CaO (óxido de cálcio) do concreto, diminuindo a resistência e aumentando a quantidade de poros da massa, aumentando sua permeabilidade.

Conforme comenta Canovas [6], a água, quando não contém substâncias nocivas, é um bom aliado do concreto, especialmente durante a sua fase de cura. Entretanto, quando é pura ou traz dissolvidas substâncias químicas procedentes do ar, da terra ou de produtos químicos de despejo, converte-se em grande inimigo. Segundo Kormann [11], qualquer que seja o contato da estrutura com água, sendo esta dura ou mole, será nocivo para a estabilidade química do concreto. A formação de água dura é facilitada por temperaturas baixas e condensação de neblina ou vapor e, a água mole é decorrente das chuvas ou fusão de gelo ou neve. Esses dois tipos de água contêm pouco ou nenhum cálcio. E, sendo o hidróxido de cálcio o componente mais susceptível à hidrólise,

fato agravado se a água presente for de um desses dois tipos citados, ocorrerão o carreamento e a lixiviação do concreto de maneira bastante agressiva. A estrutura do concreto, que sofrer estes tipos de deterioração, ficará enfraquecida, e sua superfície menos resistente à abrasão e outros fenômenos erosivos, além de apresentar desconforto visual com a formação de eflorescências. A reação álcali-agregado é outro fenômeno que é maléfico ao concreto, pois podem causar fissuração e expansão, fazendo com que o concreto perca sua resistência e durabilidade. Este tipo de reações envolve os álcalis presentes no cimento e elementos reativos que os agregados possam conter, como compostos de sílica e minerais silicosos, sendo que a presença de água e umidade é determinante para a expansão, segundo Forster [8]. As composições químicas do cimento, bem como a quantidade, tamanho e tipo do agregado reativo, a composição química do gel de silicato alcalino formado, são determinantes quanto à existência de reação álcali-agregado e seu grau de severidade.

Apesar de existirem diversas situações em que ocorre deterioração por ataques químicos, as mais relevantes que geram erosão nas superfícies do concreto das galerias de águas pluviais são os sulfatos e corrosão biogênica.

5.2 Deterioração causada por sulfatos

Os sulfatos podem ter origem nos materiais que compõem o concreto ou no contato do concreto com os solos ou águas ricas com este agente. O ataque produzido por sulfatos é devido à sua ação expansiva, que pode gerar tensões capazes de fissurá-lo. Os sulfatos podem penetrar desde o exterior por difusão iônica ou por sucção capilar.

Todos os sulfatos são potencialmente danosos ao concreto, reagindo com a pasta de cimento hidratado. No ataque, os íons sulfatos reagem principalmente com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e o aluminato tri-cálcico C_3A , originando a etringita e o gesso. Esta formação expande-se, exercendo pressão e desintegrando a pasta de cimento.

Pode-se aumentar a resistência do concreto contra o ataque de sulfatos através da redução do fator água/cimento, com o uso de cimento resistente à sulfatos, com baixo teor de aluminato tri-cálcico, e com a introdução de proporções adequadas de sílica ativa e cinzas volantes.

A severidade da deterioração do concreto por ataque de sulfatos está relacionada com a concentração de íons sulfatos e da composição da pasta de cimento. O concreto fissura com a expansão da pasta de cimento, permitindo a penetração de água e facilitando as erosões das superfícies. Também pode ocorrer deterioração por perda de massa e, conseqüente perda de resistência, conforme citado por Mehta e Monteiro [15]. Geralmente os compostos de sulfato têm origem natural nas águas, mas podem ser provenientes de agrotóxicos ou dejetos industriais. O componente mais reativo com os sulfatos é o Ca(OH)_2 , mas outros compostos contendo alumina da pasta também podem reagir. O ataque por sulfatos nas galerias de água pluviais é influenciado por alguns fatores, como a quantidade e natureza do sulfato, o nível de água e sua variação sazonal, a forma da estrutura, e a qualidade do concreto.

Importante composto formado pela reação com sulfato é a etringita, que é o produto resultante da reação do sulfato de cálcio com o aluminato de cálcio hidratado presente na pasta de cimento. Além

de ser um composto extremamente frágil, a formação da etringita causa expansão, podendo fissurar o concreto. Mas os problemas de ataque por sulfatos não consistem apenas nas reações expansivas e na fissuração, mas também há redução da resistência do concreto devido à perda de coesão da pasta de cimento e aderência da pasta aos agregados, segundo Neville [16].

5.3 Deterioração causada por corrosão biogênica

Na prática o mais significativo ataque biológico ao concreto das galerias de águas pluviais é o que ocorre devido a presença de esgotos lançados nos fluxos de água, normalmente de forma clandestina.

Nos esgotos, em condições anaeróbicas, as bactérias produzem ácido sulfídrico, composto de pouca agressividade ao concreto. Ao escapar de dentro do esgoto para o ar, o ácido sulfídrico vai colocar-se ao alcance de bactérias aeróbicas, que habitam na superfície livre do esgoto. Estas bactérias transformam o ácido sulfídrico em ácido sulfúrico, que é bastante agressivo ao concreto, dando-se um ataque de ácidos de sulfatos, que vai provocar uma rápida degradação da superfície livre interna da estrutura de concreto em contato com o esgoto, com velocidades de ataque na ordem de 5 a 10 mm por ano.

Atenção especial deve ser dada ao ataque do ácido sulfúrico biogênico, pois trata-se do maior potencial de deterioração existente em estruturas com fluxos contaminados de esgotos, conforme mostrado na figura 12. O concreto em contato com o esgoto está sujeito à ação de bactérias, como o *Thiobacillus thiooxidans* e o *Thiobacillus concretivorus*, que oxidam compostos de enxofre presentes no esgoto e os transformam em ácido sulfúrico biogênico. Estas bactérias são aeróbicas e necessitam da presença de oxigênio e, portanto, a ação oxidante destas bactérias costuma ocasionar corrosão nas estruturas de concreto, segundo Silva [18].

Seus processos metabólicos ocasionam valores de pH do ácido sulfúrico biogênico em torno de 2, podendo alcançar valores de até 0,5. As condições favoráveis para a produção do H_2S são as

Figura 12 – Degradação do concreto por corrosão biogênica



Figura 13 – A severa degradação corroeu toda a base da parede de concreto da galeria do Córrego da Serra



águas de escoamento com baixa velocidade do fluxo, turbulência e agitação.

Segundo comenta Vaughn [19], a formação do gás sulfídrico (H_2S) é proveniente da ação redutora de bactérias anaeróbicas *Desulfovibrio desulfuricans* sobre compostos orgânicos ou inorgânicos de enxofre presentes nos esgotos, e possuem o inconveniente do cheiro de "ovo podre". Grandes deteriorações podem ocorrer no concreto destas estruturas com perdas que podem chegar a 7 cm de cobertura do concreto em menos de 5 anos.

Depois que o gás H_2S se espalha pelo ar em cima da água de efluentes, uma bactéria anaeróbica do gênero *Thiobacillus* cria colônias na superfície acima da linha de água, metaboliza o gás H_2S e oxida-o para ácido sulfúrico (H_2SO_4). Este processo ocorre em locais onde há uma concentração de H_2S acima de 2ppm, umidade relativa alta e altos níveis de oxigênio.

O ácido sulfúrico (H_2SO_4) ataca a matriz do concreto. O produto primário da decomposição pela corrosão biogênica é o sulfato de cálcio ($CaSO_4$), uma massa branca, pastosa, acima da linha de água. Outro dano causado por esta corrosão é a formação de etringita. Quando o $CaSO_4$ ou a etringita se formam, estes produtos expansivos podem aumentar a pressão interna, causando microfissuras na camada de cobertura das armaduras, segundo Vaughn [19].

Nas inspeções feitas nas galerias pluviais em Belo Horizonte, os efeitos da corrosão biogênica foram observados principalmente acima da linha de água mais constante, provocando perda de seção de concreto ao longo das paredes, podendo ser tão severa que pode levar, em alguns casos, a erosão completa da parte inferior da parede, conforme Figura 13.

Os efeitos da corrosão biogênica são observados também nas lajes de teto das galerias, quando o gás sulfídrico presente na atmosfera confinada causa a deterioração superficial do concreto, deixando as armaduras expostas no teto da estrutura. Nas barras aço desprotegidas instaura-se o processo de corrosão, que vai

pouco a pouco consumindo os metais, conforme figura 14, até seu rompimento. A exposição e a conseqüente corrosão das barras de aço são mais relevantes nas obras onde houve deficiência de espessura da camada de cobrimento das armaduras.

5.4 Medidas de proteção contra a erosão química

Quanto menor for a permeabilidade do concreto, menores serão os danos causados por ataques químicos nas estruturas, visto que as reações químicas ocorrem de maneira mais lenta. Portanto, o adensamento do concreto é importante para que o concreto seja resistente aos ataques químicos, salienta Neville [16].

Importante também é ressaltar que a durabilidade e a resistência do concreto aos ataques químicos podem ser aumentadas se o processo de cura for apropriado, garantindo que as reações de endurecimento sejam adequadas.

A erosão química pode ser minimizada pelo uso de cimentos especiais, pozolanas e com o uso de outras adições, além de diversos tipos de camadas e selantes protetores aplicados na superfície do concreto. As pozolanas fixam o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que é um produto mais vulnerável a reações com ácidos. A utilização de sílica ativa proporciona ao concreto menor porosidade, dificultando a penetração da água em seus poros.

A possível prevenção quanto ao ataque por sulfatos poderá ser alcançada se o concreto apresentar boa qualidade, ou seja, fatores como, permeabilidade, baixa relação água/cimento, adensamento e cura sejam preponderantes quanto a estes aspectos, segundo Mehta e Monteiro [15]. Há também a possibilidade do uso de cimentos resistentes a sulfatos, além da redução do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com a adição de escórias, sílica ativa e pozolanas, segundo Neville [16]. Uma das precauções quanto à existência de reações álcali-agregado é o estudo da quantidade de álcalis no cimento, assim como da reatividade do agregado a ser utilizado. A utilização de

cimentos com baixa concentração de álcalis auxilia na inibição dessas reações. Também a adição de pozolanas, como a escória granulada de alto forno e a sílica ativa, contribuem na diminuição da concentração de álcalis, pois, estes, quando presentes nestas adições, são insolúveis em meio ácido e não reagirão com os agregados, comentam Mehta e Monteiro [15].

A corrosão da armadura é diretamente facilitada pela permeabilidade do concreto, ou seja, quanto mais poroso for o concreto mais susceptível estará a estrutura a este tipo de deterioração. A espessura de cobrimento adequado ao meio no qual a estrutura estiver inserida tem papel fundamental na boa qualidade do concreto. Além disso, existem membranas protetoras, coberturas de concreto impermeáveis, argamassas de cimento com adição de emulsões de polímeros, que não sejam à base de sais de cloretos, e revestimentos para as barras de aço como a proteção de zinco ou a pintura epóxi que, têm sido utilizadas com sucesso, com o intuito de evitar problemas de corrosão, conforme Mehta e Monteiro [15].

6. Conclusões

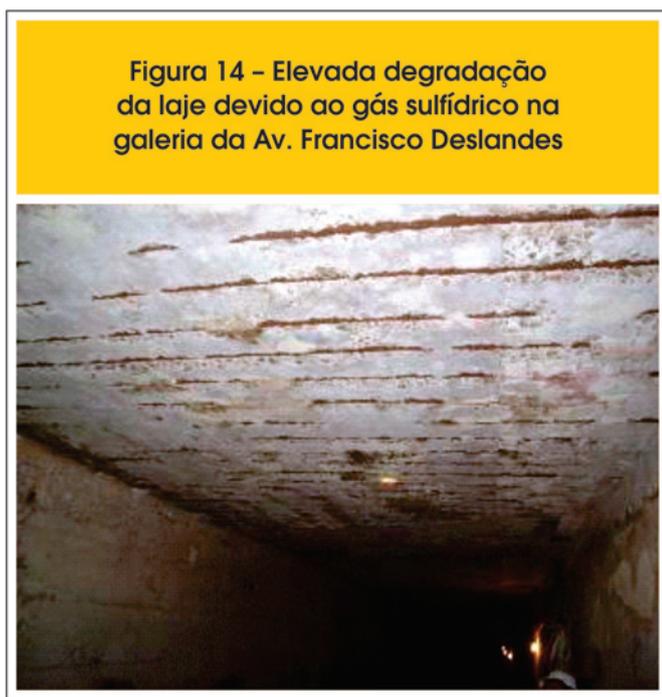
As manifestações patológicas, principalmente as erosões por abrasão, cavitação e ataques químicos, encontradas nas estruturas de concreto das galerias de águas pluviais, com base nas inspeções feitas na rede de drenagem de Belo Horizonte, são progressivas, e paulatinamente degradam as estruturas, podendo levá-las ao colapso em pouco tempo de construção. Este procedimento deve servir de parâmetro para outras cidades, que, normalmente, não realizam inspeções nas redes de drenagem urbana.

Como as administrações públicas não dispõem de metodologias para elaboração de um plano de manutenção preventiva para conservar as estruturas, verifica-se, lamentavelmente, que as intervenções de manutenção em galerias de águas pluviais só ocorrem de forma corretiva, quando a degradação atinge nível tão elevado que a estabilidade das estruturas já está seriamente comprometida, com eminente risco de acidentes para os pedestres e o tráfego do local, exigindo recursos muito maiores se ações preventivas tivessem sido tomadas.

Este trabalho enseja a realização de pesquisas complementares correlacionando o surgimento e a evolução das patologias com as características técnicas e operacionais das galerias de águas pluviais, como forma de subsidiar a elaboração de planos de gestão patrimonial dos sistemas de drenagem urbana.

7. Bibliografia

- [01] AGUIAR, J.E. Patologias que comprometem a durabilidade do concreto em galerias de águas pluviais. In Anais do 42º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza. 15p., 200.
- [02] AGUIAR, J.E.; BAPTISTA, M.B. Estudo das patologias de concreto das galerias de águas pluviais de Belo Horizonte. Campo Grande MS XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 20p., 2009.
- [03] AÏTCIN, P. C. Concreto de alto desempenho. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: Editora Pini. 667p., 200.
- [04] ALMEIDA, I. R. Influência da resistência à abrasão do agregado graúdo na resistência à abrasão de concretos de alto desempenho. Congresso Brasileiro



- do Concreto. Ceará. Fortaleza: IBRACON. 123p., 200.
- [05] BORSARI, R. D. A cavitação por irregularidade de superfície e a areação como forma de prevenção. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo. 246p., 1986.
- [06] CANOVAS, M. F. Patologia e terapia do concreto armado. Editora Pini. 522p., 1988.
- [07] DALFRÉ, J.G. Desenvolvimento de equipamento para avaliação de erosão por cavitação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Estadual de Campinas, São Paulo. 97p., 2002.
- [08] FORSTER, S.W. *et al.* Report on Alkali-Aggregate Reactivity. American Concrete Institute ACI 221. 1 R-98. 31p., 1998.
- [09] GRAHAM, J.R. *et al.* Erosion of Concrete in Hydraulic Structures. American Concrete Institute ACI 210R-93. 23p., 200.
- [10] KORMANN, A.C. *et al.* Processos erosivos em superfícies de concreto de barragens – mecanismo e recuperação XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Fortaleza/ CE. 11p., 2001.
- [11] KORMANN, A.C.M. Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Paraná. 196p., 2002.
- [12] LEONARDO, C.R.T. Estudo de concreto de alto desempenho visando a aplicação em reparos estruturais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Paraná. 132p., 2002.
- [13] MAclNNIS, C. *et al.* Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service. American Concrete Institute ACI 201.1 R-92. 16p., 1997.
- [14] McDONALD, J. E. An Evaluation of Materials for Repair of Erosion Damage in Hidraulic Structures. HPMS&S High-Performance Materials and Systems Reserch Program. Disponível em www.wes.army.mil/SL/HPMS/hpms.htm. 10p., 2002.
- [15] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3ª edição. São Paulo: Pini. 673p., 2008.
- [16] NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2ª edição. Tradução de Salvador Giamusso. São Paulo: Pini. 737p., 1997.
- [17] QUINTELA, A. C.; RAMOS, C. M. Protecção contra a erosão de cavitação em obras hidráulicas. Memória nº 539. Lisboa: LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 73p., 198.
- [18] SILVA, M.R. Biodeterioração do concreto. IBRACON, Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações, Vol II, Capítulo 28, pp.587-878, 2005.
- [19] VAUGHN, O., Understanding Biogenic Sulfide Corrosion. Materials Performance. pp.36 – 39, 2007.