

MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DO DESGASTE EM AMOSTRAS DE CONCRETO SUBMETIDAS À ABRASÃO E À CAVITAÇÃO

José Gilberto Dalfré Filho; Ana I. B. Genovez

Resumen:

As estruturas hidráulicas estão sujeitas a ação de diversos mecanismos que podem colocá-las em situação de risco. Os problemas de cavitação e abrasão nestas estruturas são importantes e em especial, as áreas superficiais devem ser resistentes. Em muitos casos os danos são tão grandes que reduzem a vida útil da obra e também obrigam a largos períodos de interrupção de funcionamento. Este trabalho apresenta um equipamento para simular o efeito da ação da mistura água sólido e outro equipamento tipo jato cavitante para simular o efeito da cavitação, assim como as respectivas metodologias para os ensaios em amostras de concreto. Os tempos necessários para a realização dos testes à cavitação com o equipamento tipo jato cavitante são curtos, especialmente quando comparados ao dispositivo Venturi, da mesma forma que requer uma área de montagem pequena. O dispositivo que simula a ação da abrasão em amostras de concretos possui uma metodologia de ensaio bem definida. Os equipamentos e as metodologias propostos são adequados para os ensaios de concretos submetidos à cavitação e a abrasão. A partir da normalização destes ensaios é possível testar amostras de concreto a serem empregadas nas estruturas hidráulicas, auxiliando assim, os projetistas destas estruturas.

Palabras clave: estudo experimental-abrasão-cavitação

INTRODUÇÃO

As áreas superficiais das estruturas hidráulicas de concreto estão sujeitas a ação de diversos mecanismos de degradação, entre os quais, a erosão causada pela mistura água-sólido e pelo fenômeno da cavitação. Segundo Neville (1997) para as condições de exposição das estruturas de concreto, tanto a resistência como a durabilidade devem ser explicitamente consideradas na fase de projeto. Ademais, para garantir a durabilidade do concreto é necessário definir os procedimentos de manutenção regular.

O efeito abrasivo de rochas, cascalhos e outros sólidos escoando através de uma superfície de concreto pode causar sérios danos a esta superfície. Tal situação acontece durante a fase de construção (galerias de desvio) e durante a operação da estrutura hidráulica (tubos de sucção, vertedores e bacia de dissipação). Como exemplo, podemos citar o caso da Usina Hidrelétrica de Marimondo, onde o efeito causado pela circulação de pedras na bacia de dissipação causou a destruição de

toda a camada superficial de concreto de acordo com Dalfré Filho, Genovez e Paulon (2000). As bacias de dissipação se transformam em locais onde se produz a retenção em muitos casos, de material sólido. O concreto não suporta o efeito desgastante provocado pela ação dinâmica da mistura água-sólido. Conforme citado por Liu (1981) chega a provocar desgastes que podem atingir desde alguns centímetros até mais de um metro. Na sua pesquisa constatou erosões máximas de 3,0 m de profundidade numa bacia de dissipação, com perda tanto do concreto no fundo da estrutura como de parte da fundação constituída por rocha, obtendo-se, aproximadamente, 1500 m³ de material removido.

A erosão causada ao concreto pela ação abrasiva de materiais no escoamento pode ser tão severa como o dano por cavitação, mas, geralmente, não causa danos catastróficos como causa facilmente a cavitação. Nos locais onde baixas pressões não podem ser evitadas, essas áreas críticas são revestidas com metais ou outros tipos de materiais que oferecem melhor resistência ao ataque.

Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)Cx. Postal 6021, CEP 13083-970 – Campinas, Estado de São Paulo - Brasil Fax: 55(19)37882411, e-mail: dalfre@fec.unicamp.br

Artículo recibido el 2 de junio de 2004, recibido en forma revisada el 10 de septiembre de 2004 y aceptado para su publicación el 30 de septiembre de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

A introdução do ar no escoamento através dos aeradores mostra-se eficiente em reduzir a ocorrência da cavitação e diminuindo os seus efeitos. Os projetistas devem utilizar-se das informações existentes baseadas nas experiências e decisões de projetos anteriores. Como tecnologia de aeração, pode-se utilizar como referência o trabalho de Pinto (1979), em Foz de Areia, citado por Jansen (1988).

As estruturas danificadas pela abrasão ou pela cavitação sofrem reparos empregando uma variedade de materiais e técnicas com diferentes graus de sucesso. Em muitos casos os materiais são utilizados para fazer reparos no protótipo, sem os ensaios de laboratório necessários para testar sua aplicabilidade. Assim, a composição do concreto deve ser executada com materiais adequados ao tipo de ação a que estará sujeito, de forma que a escolha dos agregados e do traço empregado torna-se o fator preponderante para a garantia de durabilidade. Para tanto, diferentes equipamentos e metodologias de ensaios foram propostas para testar esses materiais, simulando o efeito da abrasão e da cavitação presentes nas estruturas hidráulicas.

OBJETIVO

A proposta deste trabalho é apresentar dois tipos de equipamentos e respectivos métodos de ensaios em amostras de concreto. O primeiro equipamento refere-se aos ensaios para simular a ação da mistura água-sólido e o segundo, aos ensaios para simular o efeito erosivo do fenômeno da cavitação. As pesquisas foram realizadas no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, aonde foram testadas diversas amostras de concretos, com diferentes agregados, traços e composições.

PESQUISAS EXISTENTES NA ÁREA DA CAVITAÇÃO E ABRASÃO

Equipamentos utilizados para o caso da abrasão

O trabalho de Liu (1981) enumera diversos tipos de ensaios que têm sido usados para avaliar a resistência por abrasão, salientando que nenhum deles é satisfatório para avaliar a resistência do concreto à erosão provocada pela ação dinâmica da água sob a presença de sólidos. Para suprir a falta de um equipamento adequado é utilizado em

seu estudo o equipamento descrito para avaliar o desgaste, assim como também são empregados concretos de diferentes qualidades, de acordo com as especificações comuns às obras executadas no seu país.

Para o caso de ensaios de concretos submetidos à ação da mistura água-sólido, o equipamento utilizado por Liu (1981), e adotado por Dalfré Filho, Genovez e Paulon (2000) consiste de um recipiente metálico onde são colocadas as amostras. Para simular o efeito abrasivo do material sólido sobre uma superfície de concreto são usadas esferas de aço, com diferentes diâmetros, posicionadas sobre as amostras. O recipiente é, então, preenchido com água. Uma pá agitadora simula o efeito do transporte de sólidos pelo escoamento. Na seqüência, são apresentados trabalhos onde se utilizou essa sistemática de ensaios.

No trabalho de Braga, Rosário e Marchante (1983) os autores verificaram o comportamento do concreto com fibras de aço e materiais que podem ser utilizados como revestimento para o caso de reparos em superfícies as quais sofreram abrasão (argamassas epoxídicas). No seu trabalho foram usados os mesmos materiais da obra de Itaipu, além dos cascalhos provenientes do rio Paraná utilizados na construção da usina hidroelétrica de Ilha Solteira. Como resultado foi observada uma variação aproximadamente linear do desgaste por abrasão com a relação água cimento. Os concretos sem a incorporação de ar apresentaram maior resistência à abrasão bem como observaram uma relativa eficiência com a pintura de material epoxídico. O tipo de agregado utilizado nas misturas de concreto também influenciou a resistência a abrasão, pois as misturas com cascalho apresentaram menor desgaste que aquele verificado quando se usava o agregado graúdo britado.

Andrade et al (1991) utilizaram agregados graúdos de diferentes formas e composições mineralógicas nos concretos ensaiados (granito, quartzo, xisto, material cerâmico, seixo rolado, gnaisse) assim como diferentes relações água/cimento. Os autores também verificaram o aumento da resistência a abrasão com a diminuição da relação água/cimento. Observaram influência significativa do tipo litológico do agregado no desgaste de concretos, tendo apresentado os melhores resultados o seixo rolado e o granito. Os agregados de forma arredondada como o seixo rolado e o agregado cerâmico apresentaram melhor performance do ponto de vista do desgaste, segundo os autores.

Equipamentos utilizados para o caso da cavitação

Diversos equipamentos foram propostos para avaliar o dano em amostras devido à cavitação. Peterka (1955) citado por Quintela e Ramos (1980) realizou ensaios de corpos de prova de concreto em um dispositivo experimental tipo Venturi, destinado a ensaios de cavitação, com e sem a injeção de ar, verificando este efeito sobre as amostras. A duração de cada ensaio foi de 2 horas e a velocidade na zona estrangulada excedia 30m/s.

Houlston e Vickers (1978), estabeleceram a eficiência entre a utilização da cavitação para limpeza de superfícies em relação à limpeza convencional com jato. O equipamento utilizado constitui-se de um jato de água contínuo produzido por um pistão diferencial intensificador óleo-para-água, agindo em conjunto com um circuito de válvulas.

Lichtarowicz (1979) utilizou equipamento de ensaio no qual um jato submerso é utilizado para erodir uma amostra. O bocal em si consiste de uma jóia sintética de safira como orifício. Uma entrada cônica aumenta o coeficiente de descarga, sem afetar a performance da cavitação. O equipamento foi dimensionado para suportar pressões de até 35MPa.

Um equipamento muito utilizado é o dispositivo tipo Venturi (onde a aceleração provocada no escoamento com uma peça convergente gera baixas pressões na região da garganta e, com a desaceleração do movimento na peça divergente surge, em determinadas condições, cavitação). Neste dispositivo pode ser produzido um dano de 12mm de profundidade no concreto após 3 horas de ensaios a velocidade de 30m/s ou 35 horas em concretos com polímeros ou em aço inoxidável após 6000 horas conforme constatou Colgate (1977) citado por Falvey (1984). Devido aos tempos longos de ensaios que requer esse tipo de ensaio, equipamentos de erosão acelerada foram sendo desenvolvidos, como o equipamento tipo jato cavitante.

Cheng, Webster e Wong (1990) estudaram o efeito da cavitação em amostras de concreto utilizando um aparelho tipo jato cavitante. Compararam também os métodos de ensaios: teste vibratório ultra-sônico e o dispositivo Venturi. O equipamento tipo jato cavitante cria uma força maior que aquela gerada por um simples jato de alta pressão e,

acredita-se que esta técnica possa ser utilizada de forma a simular o efeito combinado do escoamento em alta velocidade e cavitação, que são experimentadas em estruturas hidráulicas. Os autores apresentaram um desenho esquemático do equipamento jato cavitante, porém não indicaram o tipo de orifício empregado.

Coleman et al (1995) estudaram o comportamento de diferentes metais frente a ação da cavitação. Dois métodos de ensaios foram comparados o túnel de cavitação e o equipamento tipo jato cavitante. Os autores citam como desvantagens do túnel de cavitação os tempos longos de ensaios, e o tamanho da instalação, ao exemplo do Venturi citado por Cheng, Webster e Wong (1990). Para o caso do equipamento tipo jato cavitante foi utilizada bomba de deslocamento direto, fornecendo uma pressão a montante do bocal de 140bar, que bombeava a água até a amostra de metal, passando por um orifício de 1mm de diâmetro e 4mm de comprimento, produzindo um jato com velocidade de 167m/s. A distância da amostra até o orifício foi de 40mm. O índice de cavitação foi mantido a um valor de 0,0143, estando a temperatura da água mantida a 20°C. Os tempos de ensaios dos diferentes tipos de metais ensaiados variaram de 15 a 245min. Como o objetivo destes ensaios era de aumentar a taxa de erosão, tornando o estudo do comportamento das amostras mais rápido, a velocidade do jato foi aumentada para 200m/s, a distância entre o orifício e amostra diminuída para 34mm e a pressão a montante do bocal aumentada para 200bar. Contudo manteve-se o mesmo valor do índice de cavitação para instalação. Os autores citam que é possível identificar quatro estágios de erosão, sendo um período inicial de incubação, onde não há perda de material mensurável, um período de acumulação associado ao aumento da taxa de erosão, um período de atenuação quando a taxa de erosão decresce e, finalmente um período de erosão estável. Porém, cada material possui uma curva característica onde a extensão de cada período difere entre os materiais estudados. Assim, encontram-se, inclusive, diferenças na ordem da quantidade de erosão dos materiais estudados em diferentes equipamentos, como o jato cavitante, o Venturi ou o túnel de cavitação.

Momber (2000) estudou o comportamento do concreto sob a ação da cavitação em curtos períodos de tempos (de 2 a 10 segundos). Sabe-se que a cavitação é um processo de remoção de material e pode, então, contribuir aos processos de hidrodemolição com jatos de água. Para isso,

utilizou uma câmara que consiste basicamente de entrada de água, um estreitamento para a ocorrência do fenômeno cavitante seguida de uma estrutura para fixação da amostra de concreto a ser erodida e a saída de água. Para os ensaios foram utilizadas duas amostras de concreto, com resistências de 21 e 39MPa. O índice de cavitação utilizado nos ensaios foi de 0,075. Cada uma das amostras foi ensaiada nos tempos de 2 e 10s. O autor verificou que para o tempo de 2s, não foi possível detectar perda de peso da amostra. Porém, comparando os perfis das superfícies das amostras antes e após os ensaios verificam-se mudanças significativas devido ao efeito erosivo da cavitação. Tais alterações não foram estudadas quantitativamente, mas segundo Momber (2000) ilustram que no primeiro estágio da cavitação, a superfície é microscopicamente modificada. Essa rugosidade inicial promove as condições para o subsequente escoamento cavitante. É citada, também, a investigação da influência do perfil de uma superfície e a velocidade do escoamento no desenvolvimento da cavitação encontrando-se que, independentemente da geometria, uma saliência de 5mm de altura promove o desenvolvimento da cavitação a uma magnitude de velocidade de escoamento em torno de 4,0m/s. Conclui o autor que essa velocidade será atingida em qualquer jato que desenvolva uma pressão de estagnação de 25MPa na superfície sólida.

No trabalho de Dalfré Filho (2002) são citados os estudos feitos por Gikas (1981), Conn et al (1984), Amblard, Bonazzi e Lecoffre (1988), Avellan e Farhat (1988), Bonazzi e Fournier (1988), dentre outros que desenvolveram diferentes equipamentos para simular o efeito da cavitação. Encontra-se extensa bibliografia sobre o problema da erosão por cavitação na área mecânica, com estudos sistemáticos em materiais metálicos especialmente. Porém, não há uma normalização do equipamento de ensaio para a cavitação e poucos dados existem quando se quer conhecer a resistência dos concretos especiais para uso nas estruturas hidráulicas.

EQUIPAMENTO PARA SIMULAÇÃO DO EFEITO ABRASIVO DA MISTURA ÁGUA SÓLIDO

Para a determinação do desgaste do concreto foi necessária a construção de um equipamento de ensaio específico, adaptado de Liu (1981). O aparelho de ensaio simula a ação abrasiva da água em movimento, contendo objetos sólidos em suspensão (silte, areia, pedras e outros sólidos).

A metodologia utilizada seguiu o procedimento Furnas 1-07-22 (1994), exceto que neste trabalho, os corpos de prova foram armazenados submersos até o início dos ensaios. O esquema do equipamento utilizado encontra-se na Figura 1. O motor utilizado tem 1 HP de potência e velocidade de rotação do motor da pá agitadora de 1200rpm. O número de esferas e os respectivos diâmetros, bem como os procedimentos de moldagem e armazenagem dos corpos de prova estão apresentados no trabalho de Dalfré Filho, Genovez e Paulon (2000).

Como primeira fase dos ensaios, foi determinada a melhor relação água/cimento, comparando os valores obtidos para a resistência à compressão axial simples. Foram ensaiados corpos de prova cilíndricos de 150x300 mm, com relação água/cimento 0,3 e 0,45. Na segunda fase, definida então a melhor relação água/cimento, procedeu-se aos ensaios de abrasão.

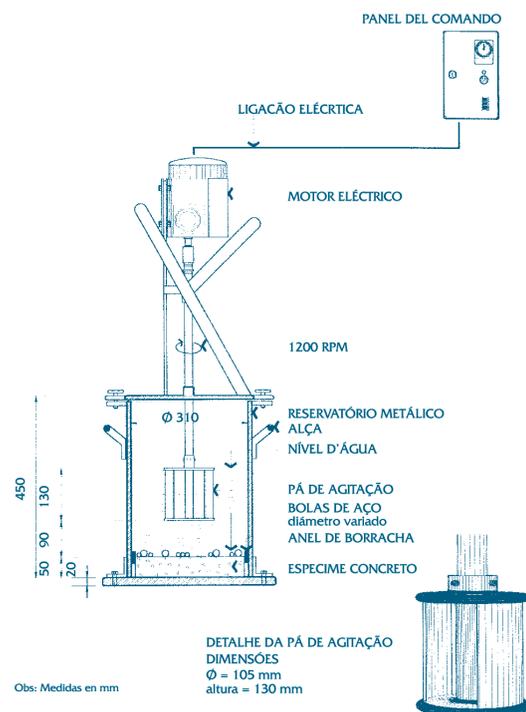


Figura 1. Desenho esquemático do banco de ensaio para abrasão adaptado de LIU (1981).

O aparelho foi ligado para o funcionamento durante 72 h efetivas. Após 24 e 48h de ação abrasiva o aparelho é desligado, o corpo de prova retirado e pesado na condição de saturado seco.

Para cada medição foi determinado o percentual de perda de peso nos diferentes intervalos.

MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DO DEGASTE EM AMOSTRAS DE CONCRETO SUBMETIDAS À ABRASÃO E À CAVITAÇÃO

Os resultados obtidos foram plotados para cada amostra indicando o comportamento do concreto analisado. Foi utilizada balança de 0,001Kg, para a determinação dos pesos.

EQUIPAMENTO PARA SIMULAÇÃO DO FENÔMENO DA CAVITAÇÃO

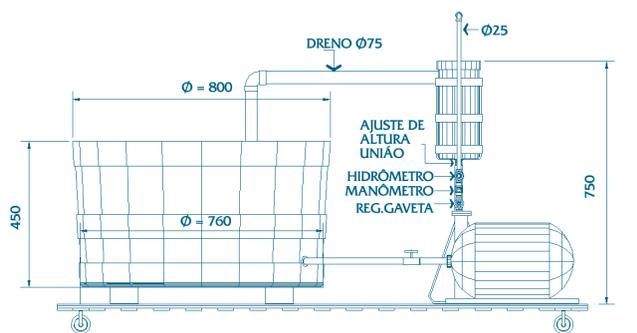
Para simular o fenômeno da cavitação que normalmente acontece durante a operação da estrutura hidráulica foi desenvolvido um equipamento de ensaio tipo jato cavitante. Na Figura 2 se encontra um desenho esquemático do banco de ensaio.

A água é conduzida do reservatório até a instalação de ensaio por meio de uma bomba e de uma tubulação flexível de baixa expansão volumétrica. Entre a bomba e a tubulação encontra-se um manômetro e um pressostato para evitar danos no equipamento caso a pressão aumente repentinamente. Na saída da tubulação há um bocal de aço inox, cônico, com ângulo de abertura de 20°, que permite a substituição de diferentes tamanhos de diâmetros de orifícios (Figura 3) e que é utilizado para simular o efeito combinado do escoamento em alta velocidade e da cavitação normalmente presente nas estruturas hidráulicas. A jusante desse orifício ocorre o jato cavitante que incide sobre uma amostra, desgastando-a. O recipiente é preenchido com água para simular a implosão das bolhas devido à cavitação.

De modo a permitir a visualização dos ensaios, as amostras são colocadas dentro de um recipiente de acrílico. A água que entra no recipiente é conduzida novamente ao reservatório através do dreno. Foi utilizada uma bomba de deslocamento direto com pressões de até 400mca. Os diâmetros dos orifícios utilizados variaram de 1,00 a 3,50mm. A distância entre a saída do orifício e a amostra de concreto variou entre 0,05m e 0,15m. Para avaliar o dano nas amostras foi utilizada lupa binocular de aumento de 40x para a contagem dos pits. As temperaturas, ambiente e da água, também foram medidas. Foram confeccionados corpos de prova adicionais para ensaios à compressão simples, de acordo com a Norma Brasileira NBR 5738.

Para a definição das variáveis de ensaio, em uma primeira etapa, foi colocada no lugar da amostra de concreto, uma chapa de aço carbono de 0,20m de diâmetro e 5mm de espessura. O equipamento foi colocado em funcionamento com o objetivo de avaliar o aparecimento da cavitação.

Seguindo a metodologia proposta, foi verificado o aparecimento do dano de 10 em 10 minutos, até o surgimento de dano visível na amostra, colocando o jato na distância máxima da amostra de 0,15m, e variando o bocal. Com o mesmo roteiro, variou-se a distância para 0,05m, para finalmente definir a distância a empregar e o diâmetro do bocal.



Obs: Medidas em mm

Figura 2. Desenho esquemático do banco de ensaio para a cavitação.

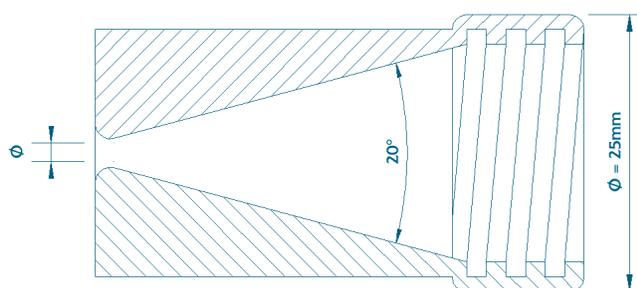


Figura 3. Desenho esquemático do bocal.

Desta maneira, uma vez definidas as variáveis de ensaios, iniciaram-se os testes para detectar a erosão por cavitação em amostras de concreto, nas condições seguintes:

Pressão na saída da bomba: 3,50 MPa;

Vazão: $6,35 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$;

Temperatura ambiente: 22 a 26°C;

Distância da amostra ao bocal: 0,05m;

Diâmetro do bocal: 3,00mm.

σ (índice de cavitação): 0,86

Os procedimentos para moldagem e armazenagem dos corpos de prova encontram-se descritos no trabalho de Dalfré Filho (2002).

RESULTADOS

A diferença entre a superfície que foi erodida e a que sofreu cavitação é notória comparando-se as superfícies resultantes do ensaio de cavitação com as de erosão provocada por uma mistura água-sólido.

De acordo com Falvey (1990) a erosão devido à abrasão é reconhecida pelo aspecto liso da superfície, onde se nota a direção do escoamento. Ao contrário, o dano causado por uma cavidade que colapsa é primeiramente devido a uma onda de pressão que caminha à velocidade do som na água. Como a velocidade do som é de 10 a 40 vezes maior que as velocidades de escoamento que são normalmente associadas com o dano, este aparenta ser causado por uma fonte perpendicular a superfície. Isso significa que não se pode identificar a direção do escoamento, examinado a área danificada. Também, este efeito causa o impacto na superfície do dano. A escala do dano na superfície depende do tamanho das bolhas que se chocam com a superfície. Em testes de laboratório como é o caso deste trabalho, a estrutura do dano é de um granulado fino, pois as bolhas são pequenas (Foto 1). Porém ao longo de um conduto de descarga, a textura é de um granulado mais grosseiro, porque as bolhas que implodem são maiores (Foto 2).



Foto 1: Aspecto de uma amostra após ensaio com o equipamento tipo jato cavitante.

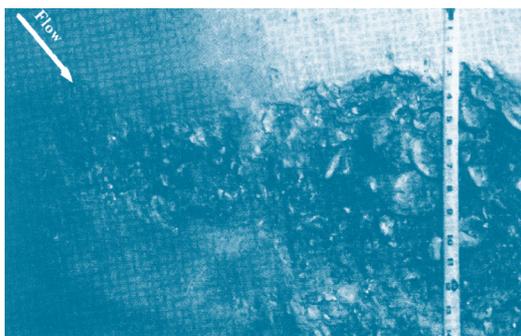


Foto 2: Início do dano no túnel vertedor da barragem Hoover, Nevada. Fonte - FALVEY (1990).

Constata-se que a progressão da erosão por cavitação em concretos progride rapidamente após um período de exposição, onde se notará textura rugosa composta por “pits”. Graham et al (1987) salientam que possíveis explicações são: a) o material imediatamente abaixo da superfície é mais vulnerável ao ataque; b) os impactos da cavitação são mais focados pela geometria dos “pits”; c) a estrutura do material foi enfraquecida pela repetição do processo (fadiga). Independente das causas, a tendência da erosão é retirar o agregado da pasta.

Comparando-se a mesma amostra (Quadro 1) ensaiada nos equipamentos apresentados neste trabalho e com as metodologias propostas, obtiveram-se os resultados apresentados nas Figuras 4 e 5 para o caso da abrasão e da cavitação.

Quadro 1: Amostra utilizada nos ensaios de cavitação e abrasão.

Amostra	Traço em massa	Relação água/cimento	Resistência à compressão (MPa)	Agregado graúdo
1	1:4	0,3	43,00	Granito

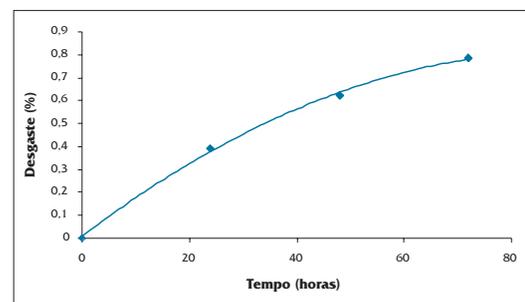


Figura 4. Desgaste da amostra 1, submetida ao efeito da abrasão, equipamento que simula o efeito abrasivo da mistura água e sólido.

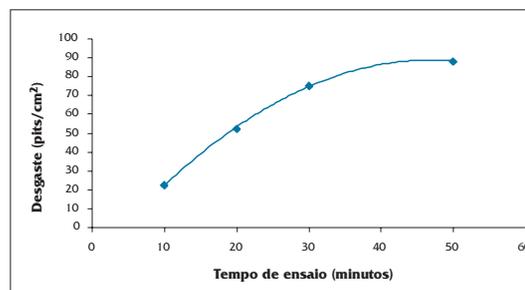


Figura 5. Desgaste da amostra 1 submetida ao efeito da cavitação, equipamento tipo jato cavitante.

O desgaste para o caso da abrasão, conforme pode ser visto na figura 4, foi caracterizado pela porcentagem de perda de peso com relação ao peso inicial até o tempo de ensaio de 72 horas.

A amostra de granito, sem adição (amostra 1) apresentou 0,783% de desgaste, após 72 horas de ensaio.

É recomendável, para o caso da abrasão, a utilização de baixa relação água/cimento e a adição, por exemplo, da sílica ativa, mesmo que este concreto apresente resistência á compressão axial superior a 28 MPa. Quanto aos agregados graúdos, os mesmos devem ser submetidos ao ensaio de abrasão Los Angeles, de maneira a verificar os melhores tipos para a utilização nas estruturas hidráulicas. Conforme os resultados dos ensaios apresentados por Dalfré, Genovez e Paulon (2000), o uso dos agregados graúdos, granito e granalha de aço, assim como aa adições de sílica ativa e nanossílica, contribuíram para o aumento da resistência das amostras.

Para a obtenção de desgaste nas amostras de concreto para o caso da cavitação é necessária uma combinação de tempo de ensaio, características da amostra (resistência e componentes) e valores apropriados do índice de cavitação. Com a redução do valor do índice de cavitação, os tempos de ensaio serão menores e haverá redução de gastos com energia e mão de obra, quando se compara com outros equipamentos e instalações.

No equipamento tipo cavitante proposto e testado no trabalho, tendo-se obtido um índice de cavitação igual a 0,86, foi possível verificar o aparecimento de fossa de erosão para amostras de resistência menor (em torno de 15MPa) em tempo inferior a vinte minutos. Por limitações da bomba, pois se temia que ela não suportasse o funcionamento prolongado à pressão máxima, não foi possível levar todas as amostras até a fossa de erosão, de acordo com o que havia sido definido como tal. Caso tivesse sido possível atingir a fossa de erosão amostra 1, além da contagem de "pits", poder-se-ia correlacionar a perda de peso da amostra nos respectivos tempos de ensaios, como no caso do desgaste por mistura água sólido.

Nos ensaios com as amostras de aço carbono no equipamento tipo jato cavitante proposto neste trabalho, verificou-se no tempo de 50 minutos o aparecimento de dano. Conclui-se pelo exposto que o mesmo material ensaiado com o Venturi, necessitaria de um tempo de teste muito maior para obter o mesmo dano do aparelho tipo jato cavitante. Também, se a bomba permitisse alcançar valores de pressão compatíveis para obtenção do índice de cavitação em torno de 0,15,

citado por Falvey (1990) como valor que provoca danos nas estruturas hidráulicas, os tempos certamente decairiam. Tempos menores de ensaio representam vantagem econômica tanto em gastos com energia a ser utilizada, como nos valores de mão de obra de técnicos envolvidos, quando se compara com os equipamentos e instalações utilizados por outros autores.

CONCLUSÕES

As estruturas hidráulicas estão sujeitas a ação de diversos mecanismos que podem colocá-las em situação de risco. Os problemas de cavitação e abrasão nestas estruturas são importantes e em especial, as áreas superficiais devem ser resistentes. Em muitos casos os danos são tão grandes que reduzem a vida útil da obra e também obrigam a largos períodos de interrupção de funcionamento.

No trabalho experimental desenvolvido foram testados os equipamentos tipo jato cavitante e dispositivo que simula a ação da mistura água sólido.

O equipamento que simula a ação da mistura água sólido é adequado para a obtenção do desgaste em amostras de concreto frente essa ação.

Com relação ao equipamento tipo jato cavitante, os gastos de energia são inferiores devido ao tempo de operação menor, apesar deste equipamento de jato cavitante necessitar uma bomba de alta pressão e, portanto, todos os cuidados inerentes à segurança na operação da instalação. O uso de bomba de deslocamento direto com pressões disponíveis maiores às utilizadas neste trabalho (diminuição do valor do índice de cavitação) diminuiriam os tempos de testes. A utilização de bocais, de diferentes geometrias e diâmetros, necessita de um estudo minucioso, para indicar aqueles que melhor se adequariam para a avaliação de amostras de concretos, assim como, dever-se-ia desenvolver algum tipo de transdutor para poder medir as pressões efetivas na saída do bocal e no ponto de impacto da amostra. Dessa maneira, é possível comparar os resultados das amostras obtidas nos trabalhos e indicar quais os melhores concretos para cada caso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade et al (1991) Abrasão do concreto em superfícies hidráulicas. IBRACON, p.297-307.

- Braga, J. A.; Rosário, L.C. e Marchante, J.O. (1983) Resistência a abrasão da superfície do concreto. In: Colóquio sobre concreto massa, São Paulo. IBRACON. p1-29 (T20).
- Cheng, C.L.; Webster, C.T. e Wong J.Y.(1990) Cavitation resistant coatings for concrete hydraulic structures. *ACI Materials Journal*, Detroit, v.87, n.6, p.594-601.
- Coleman, S.L. et al (1995) Comparison of tunnel and jet methods for cavitation erosion testing. *WEAR*, n.184, p.73-81.
- Dalfré Filho, J.G.; Genovez, A.I.B.; Paulon, W.A. (2000) Desgaste nas superfícies hidráulicas e a resistência a abrasão do concreto. *Ingeniería Estructural*. Buenos Aires, año 8, n.20, p.18-22.
- Dalfré Filho, J.G. (2002) Desenvolvimento de Equipamento para avaliação de erosão por cavitação. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Campinas. 97p.
- Falvey, H.T. (1984) Cavitation studies in tunnel spillways. In: Symposium on scale effects in modeling hydraulic structures. Ed: Kobus,H. p.5.7-1 a 5.7-5.
- Falvey, H.T. (1990) Cavitation in Chutes and Spillways. 1.ed. Denver: United States Bureau of Reclamation. 145p.
- Graham, J.R. et al (1987) ACI Committee 210. Erosion of concrete in hydraulic Structures. *ACI Materials Journal*. Detroit, v.84, n.2, p.136-157.
- Houlston, R.; Vickers, G.W. (1978) Surface cleaning using water jet cavitation and droplet erosion. In: International Symposium on Jet Cutting Technology, 4º, 1978. Jet Cutting Technology. Cranfield: BHRA The Fluid Engineering Centre, p.H1.1-H1.18.
- Jansen, Robert B. (1988) Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation. 1.ed. New York: Van Nostrand Reinhold. 799p.
- Lichtarowicz, A. (1979) Cavitating jet apparatus for cavitating erosion testing. Erosion: prevention and useful applications. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, STP 664, p. 530-549.
- Liu, T.C. (1981) Abrasion resistance of concrete. *American Concrete Institute*. Detroit, v.78, n.5, p.341-350.
- Momber, A.W. (2000) Short time cavitation erosion of concrete. *WEAR*, n.241, p. 47-52.
- Neville, A. (1997) Maintenance and durability of structures. *Concrete International*, Farmington Hills, v.19, n.11, p.52-56.
- Quintela, C.Q.; Ramos, C.M. (1980) Proteção contra a Erosão de Cavitação em Obras Hidráulicas. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 73p. (Memória 539)