

## Equipamento para Simulação da Erosão por Cavitação

José Gilberto Dalfré Filho, Ana I. B. Genovez, Edevar Luvizotto Júnior

FEC-UNICAMP-Campinas-SP-

dalfre@sec.unicamp.br, bgenovez@sec.unicamp.br, edevar@sec.unicamp.br

Recebido: 03/07/03 revisado: 04/11/04 aceito: 22/12/05

---

---

### RESUMO

O problema de cavitação nas estruturas hidráulicas é particularmente importante e em especial, as áreas superficiais devem ser resistentes. Em muitos casos, o dano provocado é tão grande que reduz a vida útil da obra e também obriga a longos períodos de interrupção de funcionamento. A erosão provocada por este fenômeno vem acompanhada de outros efeitos indesejáveis que são as vibrações estruturais e o ruído acústico. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um equipamento que permita avaliar o desgaste ocasionado pela cavitação em amostras de concreto empregados em estruturas hidráulicas. Um banco de ensaio foi montado utilizando bomba de deslocamento direto e bomba centrífuga. O emprego da bomba de deslocamento direto permitiu o desenvolvimento da cavitação. O equipamento mostrou-se adequado para a realização de ensaios de resistências de concretos, obtendo-se dano nas amostras com tempos de ensaio muito menores que os necessários com outros dispositivos permitindo, portanto, economia de energia e mão de obra. O uso da bomba centrífuga não foi adequado. Conclui-se que para obtenção de desgaste nas amostras de concreto é necessária uma combinação de tempo de ensaio, características da amostra (resistência e componentes) e valores apropriados do índice de cavitação. Os testes com amostras de concretos especiais são necessários para definir a melhor performance e poder empregar com eficiência tanto na construção como no reparo das estruturas sujeitas a este tipo de situação.

**Palavras Chave:** Cavitação; Erosão; Estruturas Hidráulicas; Estudo experimental.

---

---

### INTRODUÇÃO

A cavitação é, dentre as causas possíveis de erosões nas estruturas hidráulicas, a mais destrutiva. Em muitos casos o dano é tão grande que reduz a vida útil da obra e também obriga a largos períodos de interrupção de funcionamento. Quando aparece o dano na estrutura provocado pela cavitação, a área danificada se transforma numa nova fonte de cavitação, criando outra danificada a jusante.

O impacto da implosão das pequenas cavidades de vapor pode ser suficiente não apenas para desintegrar o concreto, mas também erodir os metais mais duros. Quando as forças resultantes do impacto excedem as forças de coesão interna do material da superfície em contato com o escoamento, verifica-se a ruptura do mesmo. Estima-se que o impacto causado pelo fenômeno da cavitação esteja acima de 69MPa (U. S. Bureau of Reclamation-1981).

O início e a intensidade da cavitação dependem da estrutura dinâmica do escoamento caracterizada pela distribuição de velocidades, características da camada limite, campos de pressões mé-

dias e de flutuações de pressão, entre outras. As razões para o surgimento da cavitação nos aproveitamentos hidráulicos vão desde o acabamento inadequado das superfícies à presença de elementos estruturais no escoamento. A cavitação pode ocorrer quando existirem degraus, rebaixos ou juntas salientes resultantes do trabalho inadequado de fôrma ou, por exemplo, rugosidade ou inclinações devido ao defeito no acabamento. Os elementos estruturais como ranhuras, juntas de dilatação, blocos de queda e de amortecimento, blocos dispersores, contrações ou expansões, podem sofrer ataque por cavitação para velocidades relativamente baixas (16 a 18 m/s, segundo Quintela e Ramos-1980). A utilização de materiais inadequados na execução ou a conjugação dos fatores mencionados podem iniciar o fenômeno erosivo.

Uma das maiores dificuldades encontradas desde o início dos estudos da cavitação, e que retardaram o seu melhor conhecimento foi o fato de ser um fenômeno associado a altas velocidades do escoamento. Em função da construção de estruturas cada vez maiores e o surgimento do fenômeno nestas estruturas, intensificou-se a pesquisa e a utiliza-

ção de dispositivos experimentais para a produção da cavitação em condições controladas.

Assim, foram utilizados dispositivos como o Venturi (onde a aceleração provocada no escoamento através de peça convergente gera baixas pressões na região da garganta, com a desaceleração do movimento na peça divergente surge a 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 após 35 horas em concretos com polímeros ou ainda 6000 horas em aço inoxidável conforme constatou Colgate (1977) citado por Falvey (1984). Constata-se que, devido aos tempos longos de ensaios deste dispositivo, deveriam ser desenvolvidos equipamentos de erosão acelerada.

## OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um equipamento que permite avaliar o desgaste ocasionado pela cavitação. Desta forma, poderá ser definido um tipo de ensaio para cavitação, pois, atualmente, não existe uma padronização, auxiliando assim, os projetistas de estruturas hidráulicas.

## EQUIPAMENTOS PARA AVALIAR DESGASTE POR CAVITAÇÃO

A maioria dos equipamentos utilizados e encontrados na literatura para testar o efeito da cavitação em concretos, empregaram o dispositivo Venturi.

O U.S. Corps of Engineers em 1976 realizou ensaios com o objetivo de determinar a resistência, com relação à erosão de cavitação, de concretos. Os ensaios foram relatados por Quintela e Ramos (1980). Para realizar os ensaios foram construídas lajes de concreto de 0,53m de largura por 3m de comprimento. Sobre essas lajes escoava água a velocidade de 37m/s, correspondente a uma vazão de 1700 l/s. Na zona inicial das lajes foram chumbadas porcas e anilhas para desencadear o processo de cavitação. Os tempos de ensaios chegaram a 200 horas. Constata-se, assim, a necessidade de instalação de porte para comportar a vazão total.

Gikas (1981) realizou ensaios com amostras de concreto, de diferentes composições, submetidas ao efeito erosivo da cavitação utilizando um dispositivo Venturi. Em uma primeira fase dos ensaios, na sua instalação utilizou bomba centrífuga de altura manométrica de 20mca e vazão 100 l/s. O

tempo de ensaio para alguns casos ultrapassou 200 horas. De maneira a reduzi-lo, a altura manométrica e vazão foram aumentadas para 50mca e 150 l/s, respectivamente. O laboratório do Centro Tecnológico de Hidráulica da USP dispunha de reservatório de dimensões condizentes com as condições de teste requeridas. As dimensões do aparelho estavam de acordo com o espaço disponível. O equipamento do autor era composto por uma tubulação de, aproximadamente, 15m de comprimento e diâmetro de 0,2m.

Um equipamento tipo jato cavitante foi utilizado por Cheng, Webster e Wong (1990), com bomba de deslocamento direto que fornecia 14,5MPa de pressão, vazão de 0,38 l/s e com motor de 3730 W. A distância entre uma amostra de concreto posicionada no fundo de um recipiente de ensaio e um bocal posicionado no extremo final da tubulação de alta pressão era de 0,051m. Os autores realizaram, nessas condições, ensaios com amostras de concretos recobertos por materiais especiais. Também, efetuaram testes com o dispositivo Venturi, sob uma carga de 137mca e vazão de 500 l/s, numa tubulação de 0,3m de diâmetro, produzindo velocidade de 32 m/s pela célula de teste. Os tempos de ensaio foram padronizados em 7 horas de duração para o caso do Venturi.

Dalfré Filho (2002) desenvolveu um equipamento para provocar a erosão por cavitação em amostras de concreto. A análise comparativa com outros equipamentos mostrou as vantagens do emprego do equipamento idealizado. Diferentes equipamentos para avaliar a erosão por cavitação foram citados no trabalho de Dalfré Filho, Genovez e Luviotto Junior (2002) como os de Lichtarowicz (1979), Conn et al (1984), Bonazzi e Fournier (1988) e Boudia et al (1997) que utilizaram o fenômeno do aparecimento de cavitação para ensaios em diferentes situações e materiais. Contudo, estes autores não realizaram ensaios com concretos submetidos à erosão por cavitação.

De acordo com o que foi apresentado, os dispositivos Venturi requerem bomba de grande capacidade de vazão, tempo de ensaio longo e espaço que não está disponível em todos os laboratórios, comparando-se com o equipamento tipo jato cavitante.

## ÍNDICE DE CAVITAÇÃO

O índice de cavitação deve ser comparado com o índice de cavitação crítico para o tipo e dimensões das irregularidades que podem interferir no escoamento. Se o valor do índice de cavitação

calculado estiver acima do valor crítico, o sistema não sofre danos.

No Quadro 1 encontram-se alguns valores do índice de cavitação crítico ( $\sigma_c$ ), que provocaram início do dano.

**Quadro 1 - Valores do índice de cavitação crítico ( $\sigma_c$ ), para diferentes tipos de irregularidades.**

Estrutura ou irregularidade	( $\sigma_c$ )
Estreitamento em túnel	1,5
Expansão brusca em túnel	0,19
Blocos dispersores	1,4 - 2,3
Ranhuradas e comportas	0,2 - 3,0
Concreto erodido (prof. max de 19,0mm)	0,6

Fonte - Graham et al (1987).

Os danos de cavitação dependem não apenas do índice de cavitação, mas também, da duração da operação e do valor absoluto da velocidade. De acordo com Falvey (1990) é prudente investigar-se a possibilidade de surgimento da cavitação para velocidades do escoamento acima de 10 m/s. Ball (1976) relata as especificações do “Bureau of Reclamation” que estabelecem que as irregularidades das superfícies de concreto não aceitáveis sejam removidas ou reduzidas a uma dimensão adequada, como pode se observar no Quadro 2.

Para superfícies bem acabadas de concreto, nas quais as irregularidades não ultrapassam chanfros com relação de 1 na vertical para 20 na horizontal, um valor prático do índice de cavitação pode ser em torno de 0,25, segundo Pinto (1984). De acordo com Falvey (1990) o índice de cavitação ( $\sigma$ ) para o qual aconteceram danos nos concretos de estruturas hidráulicas é da ordem de 0,15.

**Quadro 2 - Especificações de microrugosidades nas superfícies hidráulicas.**

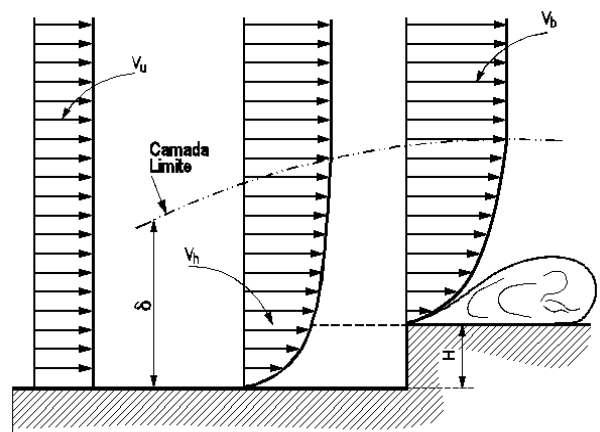
Irregularidade (H:V)	Velocidade (m/s)
20:1	12-27
50:1	27-36
100:1	> 36

Fonte - Ball (1976).

Nas situações práticas, a avaliação do índice de cavitação depende do local de referência, como mostrado na Figura 1. De acordo com Falvey (1990), por exemplo, fora da camada limite e no plano do obstáculo, o índice de cavitação pode ser calculado como:

$$\sigma_b = \frac{P_h - P_v}{\rho v_b^2 / 2} \quad (1)$$

em que ( $P_h$ ) é a pressão efetiva no plano do obstáculo, ( $P_v$ ) é a pressão efetiva do vapor da água e ( $v_b$ ) é a velocidade no plano do obstáculo.



**Figura 1 - Identificação do local de referência para o cálculo do índice de cavitação.**

Fonte - Falvey (1990).

Assim, diversas formas do índice de cavitação foram propostas, cada uma baseada nas condições de referência mais facilmente medidas. Por exemplo, o índice de cavitação ( $\sigma_j$ ) proposto para o caso de um jato submerso (Figura 2), é dado por:

$$\sigma_j = \frac{P_c - P_v}{\rho v_c^2 / 2} \quad (2)$$

em que ( $P_c$ ) é a pressão efetiva no centro do jato e ( $v_c$ ) é a velocidade no centro do jato.

Conclui-se que para a avaliação correta do índice de cavitação é necessário identificar as condições de referência, que sejam mais facilmente medidas. No caso do equipamento proposto neste trabalho, o índice de cavitação a calcular será o de  $\sigma_j$ , pois o escoamento é o de um jato submerso.

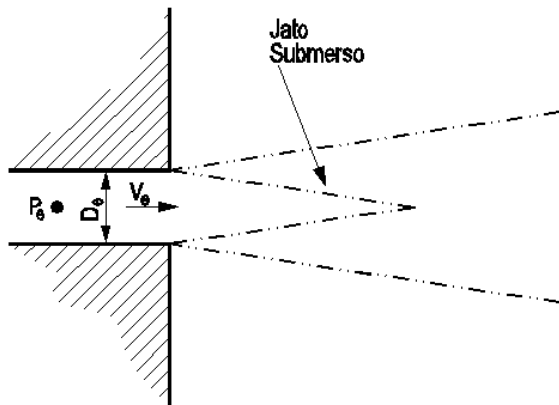


Figura 2 - Formação de jato submerso.  
Fonte - Falvey (1990).

Os resultados de diversas pesquisas estabelecem que a resistência à cavitação aumenta com o aumento da resistência a compressão e com a diminuição da relação água/cimento. Mehta e Monteiro (1994) recomendam utilizar agregado graúdo de até 20mm, que possuem menor tendência ao arrancamento pela ação da cavitação que agregados de maior tamanho, também, devem-se melhorar as condições de ligação entre o agregado e a pasta de cimento (zona de transição).

Diversos critérios são apresentados para quantificar a erosão de diferentes amostras de concreto e correlacioná-las a parâmetros de testes que permitam identificar as que apresentam maior resistência a ação erosiva da cavitação. Por exemplo, Inozemtsev et al (1965) citados por Gikas (1980) indicam o tempo de incubação e a perda de peso por unidade de tempo. O tempo de incubação é o intervalo de tempo durante o qual, apesar da ação da cavitação, não há erosão da superfície exposta. Contudo a detecção do instante em que começa a erosão é de difícil detecção, inviabilizando esse parâmetro. A perda de peso por unidade de tempo é válida se as amostras atingem a fase de erosão estável que se verifica nos ensaios de erosão por cavitação. Outro critério utilizado é verificar-se o dano ocorrido através da profundidade média de erosão após um período de tempo considerado, como fizeram Cheng, Webster e Wong (1990) ou, ainda, pelo tempo necessário para causar uma determinada profundidade média de erosão pré-definida. Esses parâmetros não levam em consideração a variação da erosão em função do tempo de ensaio. Knapp, Daily e Hammitt (1970) citam que a contagem de "pits", ou seja, o dano devido as implosões das cavi-

dades próximas a superfície das amostras, por unidade de área por unidade de tempo indicam a evolução do dano naquele material.

## BANCO DE ENSAIO

Para simular o fenômeno da cavitação durante a operação da estrutura hidráulica foi desenvolvido um equipamento de ensaio tipo jato cavitante, conforme Figura 3. A água é conduzida do reservatório até a instalação de ensaio por meio de uma bomba.

Na tubulação de sucção do equipamento foram instalados válvula de pé com crivo e filtro, enquanto que na saída da bomba foi instalado um tanque para regularização do escoamento. Um manômetro utilizando glicerina como fluido e escala de 0 a 7MPa foi empregado para medição da pressão. No projeto original previa-se utilizar tubos rígidos, mas optou-se por usar tubos flexíveis de forma a evitar cotovelos e emendas, propiciando mobilidade maior no ajuste da bancada para os testes. Assim, o tubo flexível de sucção, de diâmetro  $3,81 \times 10^{-2} \text{m}$  é comum, pois não foi submetido aos efeitos da alta pressão. O tubo flexível de recalque, constituído de borracha com duas camadas de malha de aço de baixa expansão volumétrica, diâmetro de  $2,54 \times 10^{-2} \text{m}$ , suporta pressões de até 13,8MPa.

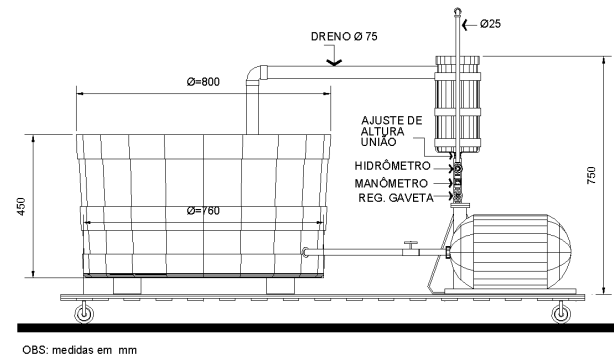


Figura 3 - Esquema do banco de ensaio utilizado.

Para simular o efeito combinado do escoamento em alta velocidade e da cavitação foram usados bocais na saída da tubulação. Os bocais são de aço inox, de geometria cônica, com ângulo de abertura de  $20^\circ$  e com diâmetros de orifícios variando de 1 a 7mm.

De modo a permitir a visualização dos ensaios, as amostras foram ensaiadas dentro de um recipiente de acrílico. Este recipiente possui dois drenos, um superior de diâmetro  $7,62 \times 10^{-2} \text{m}$ , para efetuar a restituição do líquido que passou pela

instalação ao reservatório de alimentação, o segundo localizado na parte inferior do recipiente, com válvula de PVC de diâmetro  $1,27 \times 10^{-2}$  m, serve para eventual esvaziamento do recipiente e para limpeza. Também, foi previsto dreno através de válvula de  $2,54 \times 10^{-2}$  m, para eventual esvaziamento do reservatório de alimentação.

O recipiente de acrílico e o tubo flexível de alta pressão são apoiados em suportes metálicos especialmente construídos. O suporte do recipiente de acrílico é constituído de dois tubos metálicos concêntricos, de  $3,18 \times 10^{-2}$  m e de  $2,54 \times 10^{-2}$  m, em que o tubo menor desliza dentro do maior proporcionando ajuste de 10 em 10 cm. Na parte superior do tubo maior, há uma rosca tipo “sem fim” e uma “camisa” de ferro fundido, que faz o ajuste “fino”, com passo de milímetros, ao apoiar-se o recipiente sobre esse mecanismo. Dessa maneira, é possível ajustar a distância do bocal à amostra, sem dificuldades. O suporte do tubo flexível utiliza o mesmo sistema, porém sem a rosca e camisa, permitindo giro de  $360^\circ$  do tubo interior. Todo o banco de ensaio está montado sobre uma plataforma de estrutura metálica, com tablado de madeira. Este tipo de bancada proporciona rapidez e facilidade no ajuste para os ensaios. Na Figura 4, pode-se visualizar o equipamento de ensaio construído.

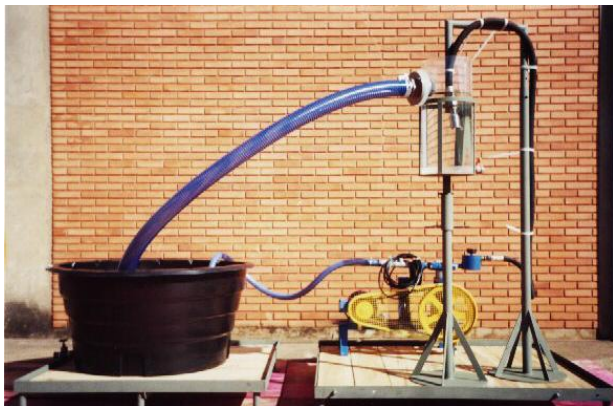


Figura 4 - Equipamento de ensaio construído.

## MÉTODO DE ENSAIO

A água é conduzida do reservatório ao recipiente de acrílico que contém a amostra, através da mangueira de borracha de baixa expansão volumétrica. O recipiente é preenchido com água para provocar a implosão das bolhas devido à cavitação.

No extremo final da tubulação encontra-se o bocal intercambiável. A jusante desse bocal ocorre o jato cavitante que incide sobre a amostra, desgas-

tando-a. A água que entra no recipiente é restituída ao reservatório pelo dreno.

Verificava-se a pressão através do manômetro. O diâmetro do orifício do bocal e a distância entre o bocal e a amostra são duas variáveis nos ensaios que devem ser definidas através dos testes. Estimam-se ensaios de curta duração, da ordem de minutos para verificar o efeito cavitante na amostra.

Desta forma, determinadas as variáveis de ensaio, é calculado o número de “pits” por área da amostra, que é o parâmetro necessário para identificar a intensidade da cavitação. Todavia, no caso de erosão é normalmente calculada a perda de peso da amostra depois de determinado número de horas de funcionamento, assim como a profundidade da erosão, verificando a influência do impacto do escoamento de alta velocidade sobre a amostra. Para medição da perda de peso das amostras nos tempos de ensaios foi utilizada balança de precisão 0,01Kg. Para a contagem dos “pits” foi usada lupa binocular de aumento 40x. Os tempos de ensaios foram cronometrados e as temperaturas do ambiente e da água, medidas. A melhor amostra de concreto seria aquela que apresentasse menor erosão.

Inicialmente, programou-se o uso de corpos de prova com 0,20m de diâmetro e 0,05m de altura para os ensaios à cavitação. Contudo, o uso deste tamanho ficou inviabilizado pela necessidade da visualização da amostra ensaiada através da lupa binocular. Para uma distância de 0,05m entre o bocal e a amostra, obteve-se uma área de incidência do jato sobre a amostra (amplitude) de 0,07m, aproximadamente. Então se estipulou o tamanho de 0,10m de diâmetro para os corpos de prova de concreto. Para cada ensaio à cavitação foram realizados ensaios suplementares de compressão axial com corpos de prova cilíndricos de 0,15m x 0,30m, de acordo com a Norma Brasileira NBR 5738.

Os corpos de prova de concreto ensaiados foram denominados de acordo com o Quadro 3, no qual constam os traços empregados, a relação água/cimento, os agregados graúdos utilizados e as resistências das amostras à compressão axial aos 28 dias.

Na amostra 2, realizou-se um furo com broca de vídia (diâmetro de 3,17mm, profundidade 8,00mm) para poder-se comparar o efeito com amostra de mesmo material, sem o furo (amostra 3). Em estudo realizado por Mefford e Falvey (1984) citado por Falvey (1990), constatou-se que um furo que possui diâmetro quatro vezes maior que sua profundidade possui índice de cavitação incipiente que é um sexto de um furo cujo diâmetro é duas vezes a sua profundidade. Significa então, melhor

que preencher um furo, que poderia se tornar uma fonte de cavitação caso o acabamento realizado não fosse adequado, seria melhor alargá-lo para quatro vezes a sua profundidade. Assim, optou-se por um furo induzido estreito e profundo, já que o intuito era desenvolver o dano devido à cavitação nos ensaios.

**Quadro 3 - Amostras de concreto utilizadas nos ensaios.**

Amostra	Traço (massa)	Relação a/c	Resistência à compressão (MPa)	Agregado graúdo
1	1:4	0,3	43,00	Granito
2	1:6,9	0,7	6,23*	Calcário
3	1:6,9	0,7	6,23*	Calcário
4	1:6,9	0,7	10,45*	Calcário

\* Como o objetivo era avaliar o equipamento em um curto período de tempo, as amostras são apenas indicativas não havendo, portanto, o intuito de indicar quais seriam as melhores amostras para uso nas estruturas hidráulicas.

**ENSAIOS**

Foram feitas duas séries de ensaios empregando duas bombas diferentes para o equipamento tipo jato cavitante. Primeiramente, testou-se com uma bomba de deslocamento direto, de alta pressão. Em seguida, para verificar o efeito de pressões menores nos ensaios, testou-se com bomba centrífuga.

**Ensaio com a instalação de bomba de deslocamento direto**

De acordo com o apresentado, iniciou-se a primeira fase dos ensaios com a instalação da bomba de deslocamento direto de 4,0 MPa e vazão de 0,42 l/s.

O equipamento originalmente recebido da indústria de bombas possuía o sistema de “escama de peixe” na saída do tanque regularizador e também na entrada do bocal, onde era fixada a mangueira através de abraçadeiras de alta pressão. Na primeira tentativa de ensaio com a bomba, ao se atingir, aproximadamente, a pressão de 1,5MPa, o tubo flexível rompeu longitudinalmente e o bocal de aço inox foi arremessado a alguns metros de distância da bomba. A tubulação especificada pelo fabricante não era apropriada para a magnitude de pressões dos ensaios deste trabalho. Procedeu-se, então, a substituição das “escamas de peixe” por sistema de roscas “NPT”, assim como a utilização de tubos flexíveis de borracha revestidos internamente

por duas camadas de malha de aço, projetados para suportar pressões de até 13,8MPa.

Através dos cálculos realizados foram projetados bocais com orifícios de 1,00 a 7,00mm de diâmetro, a serem empregados nos testes. O fabricante da bomba sugeriu que se descartasse o bocal de 1,00mm, pois sobrecarregaria o equipamento, alcançando pressões maiores que aquela suportada. Quando se instalou o bocal de 2,00mm, instantaneamente, a pressão ultrapassou 7MPa, estourando o manômetro e as seis válvulas internas da bomba. Procedeu-se a substituição das válvulas.

Em seguida, se instalou o bocal de 2,50mm. Novamente, a pressão ultrapassou 7MPa, rompendo o manômetro, válvulas e a peça da saída da bomba em ferro fundido. Foram realizados os reparos e as substituições, necessários para a continuação dos testes. Sugeriu-se que o fabricante da bomba de deslocamento direto substituísse o material ferro fundido, por material mais resistente, o que evitaria rompimentos e a possibilidade da sua utilização por tempo mais longo. Com o emprego do orifício de 3,00mm a pressão alcançada pela bomba foi de 3,5MPa, portanto, dentro dos níveis de pressão suportados pela bomba. Para garantir a segurança da instalação, foi usado um pressostato para água, escala de 0-6MPa (neste caso calibrado para 4MPa), rosca de 1,27x10<sup>-2</sup>m (BSP), de maneira a evitar que algum entupimento do bocal fizesse a pressão atingir níveis maiores que aqueles suportados. Sugeriu-se ao fabricante, também, a instalação de válvula de alívio que proporcionaria mais segurança e agilidade nos reparos, no caso de as pressões atingirem valores maiores que aqueles suportados.

As bombas de pistão possuem comportamento da curva característica com inclinação muito acentuada. Ou seja, uma pequena diminuição na vazão proporciona um grande aumento na pressão, assim, é comum utilizar válvula de alívio neste equipamento. O pressostato instalado simulou o efeito de válvula de alívio.

Com o bocal de 5,00mm, a pressão verificada no ensaio foi de apenas 0,4MPa, muito abaixo do que se pretendia para este estudo. Conseqüentemente, como a pressão era muito alta ou baixa demais isto motivou o uso dos bocais com orifícios de 3,00, 3,25 e 3,50mm de diâmetro.

Numa primeira etapa, para testar o equipamento foram utilizadas amostras de aço carbono de superfície polida e 0,20m de diâmetro. Foram empregados os bocais de 3,00, 3,25 e 3,50mm de diâmetro, variando a distância entre as amostras e a saída do bocal de 0,05m a 0,15m. A cada dez minu-

tos de testes, as amostras eram retiradas e as superfícies verificadas.

Para os ensaios com os bocais de 3,00, 3,25 e 3,50mm à distância de 0,15m, até após uma hora de funcionamento não houve qualquer sinal de desgaste na superfície dos corpos de prova testados. Nestes ensaios, a esta distância, a amplitude do jato (observar Figura 5) superou o diâmetro das amostras.

Com o mesmo procedimento, realizaram-se ensaios para a distância de 0,05m. Numa primeira fase, empregando os bocais de 3,25 e 3,50mm constatou-se que na primeira hora de funcionamento as superfícies dos corpos de prova se mantiveram intactas sem qualquer sinal de erosão. Os ensaios continuaram com o bocal de 3,00mm. Após um período de cinquenta minutos de ensaio, com o orifício de 3,00mm, foi constatada a existência de “pits”, confirmando a formação de bolhas cavitantes. Foi feita a contagem do número de “pits”, sendo da ordem de 0,05 “pits”/cm<sup>2</sup>. A amplitude máxima do jato incidindo na amostra foi de, aproximadamente, 0,07m de diâmetro, como se observa na Figura 5. Desta forma, optou-se por trabalhar com uma distância de 0,05m e o emprego do bocal com orifício de 3,00mm até o final dos testes.

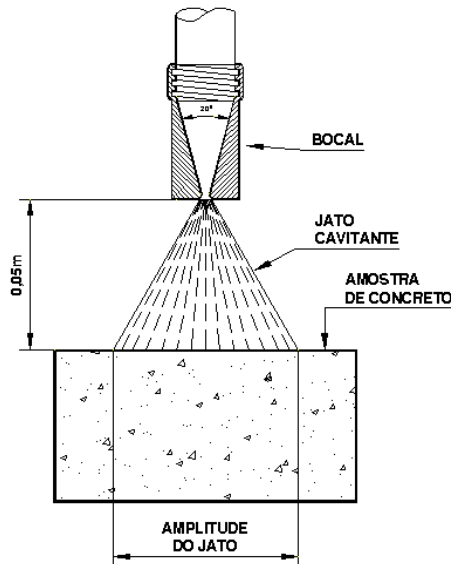


Figura 5 - Amplitude do jato.

O som proveniente deste ensaio era similar ao de “estalidos altos e intermitentes de pequenas explosões”, descrito por Tullis (1982) como característico da cavitação intensa. Permanecer ao lado do equipamento por um tempo prolongado e sem proteção auricular era impossível, pois se ouviam os ruídos a muitos metros de distância da sala onde se encontra a instalação. Através do recipiente transpa-

rente era possível visualizar o jato com a formação de bolhas incidindo sobre a amostra.

Desta maneira, iniciaram-se os ensaios para detectar a erosão por cavitação em amostras de concreto. As condições de teste foram:

- Pressão na saída da bomba: 3,50MPa;
- Vazão: 0,635 l/s;
- Temperatura ambiente: 22 a 26°C;
- Distância da amostra ao bocal: 0,05m;
- Diâmetro do bocal: 3,00mm.

**Ensaio com a instalação de bomba centrífuga**

A fim de verificar nos testes o efeito do uso de equipamento que fornecesse baixas pressões, porém vazões superiores àquelas da bomba de pistão e que ainda fosse simples e econômico, realizaram-se testes com bomba centrífuga. Para tanto, foi estipulado o uso de diâmetros maiores para os bocais (7,00mm e 9,00mm de diâmetro). A distância entre as amostras e os bocais foi de 0,05m, de maneira a manter um mesmo padrão para os resultados das duas instalações.

**RESULTADOS E ANÁLISE**

**Resultados com a bomba de deslocamento direto**

O Quadro 4 apresenta um resumo da contagem de “pits” nos tempos de ensaios, quando era possível detectá-los ou quando se constatava fossa de erosão.

**Quadro 4 - Evolução dos desgastes nas amostras de concreto.**

TEMPO (min)	AMOSTRA			
	1	2	3	4
10	22	85	40	115
20	52	Fossa de erosão*	Fossa de erosão	Fossa de erosão
30	75	Fossa de erosão	Fossa de erosão	Fossa de erosão
50	88**	Fossa de erosão	Fossa de erosão	Fossa de erosão

\* Foi considerada como fossa de erosão, erosões passíveis de medição a olho nu, próximas a 10mm de diâmetro ou 10mm profundidade, para o qual a contagem de “pits” não era possível.

\*\* Valor estimado por contagem a olho nu, a superfície se apresentava bastante rugosa, com pequenas fossas de erosão.

Na Figura 6 é apresentado o gráfico de desgaste pelo tempo, das amostras ensaiadas. Na Figura 7 verifica-se o aspecto de uma amostra após os ensaios.

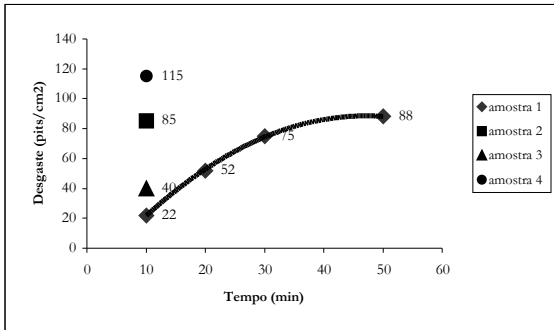


Figura 6 - Erosão nas amostras ensaiadas no equipamento tipo jato cavitante.

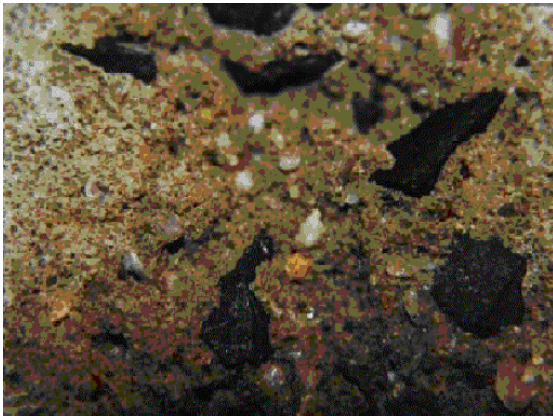


Figura 7 - Aspecto de uma amostra após os ensaios.

Para o caso de jato de água saindo de um orifício submerso, como o esquema da Figura 2, a Equação 2 é a mais adequada para o cálculo do índice de cavitação nos ensaios desta instalação. Sendo a distância entre o bocal e a amostra de 0,05m e o diâmetro do orifício de 3,00mm, tem-se:

$$P_c : 34,2 \times 10^5 \text{ Pa};$$

$$P_v : 2,33 \times 10^3 \text{ Pa à temperatura de } 20^\circ\text{C};$$

$$v_c : 89,3 \text{ m/s};$$

$$\rho : 998,2 \text{ kg/m}^3.$$

Substituindo-se os valores na Equação 2, obtém-se o índice de cavitação ( $\sigma_j$ ) de 0,86. Na Figura 8, Falvey (1990) apresenta a caracterização da cavitação em função do valor do índice de cavitação. Assim, para ( $\sigma$ ) maior que 3,00 não haverá cavi-

ção, para ( $\sigma$ ) igual a 1,8 será a cavitação incipiente. Para valores entre 1,8 e 0,3, desenvolvimento da cavitação na forma de aparecimento no seio do líquido de pequenas bolhas e, finalmente, para valores abaixo de 0,3 ter-se-ia a supercavitação, aparecimento de grandes cavidades no seio do líquido. De acordo com o resultado obtido na instalação de ensaio, o valor do índice de cavitação de 0,86 corresponde ao de cavitação desenvolvida, portanto, adequado aos ensaios de cavitação em concretos.

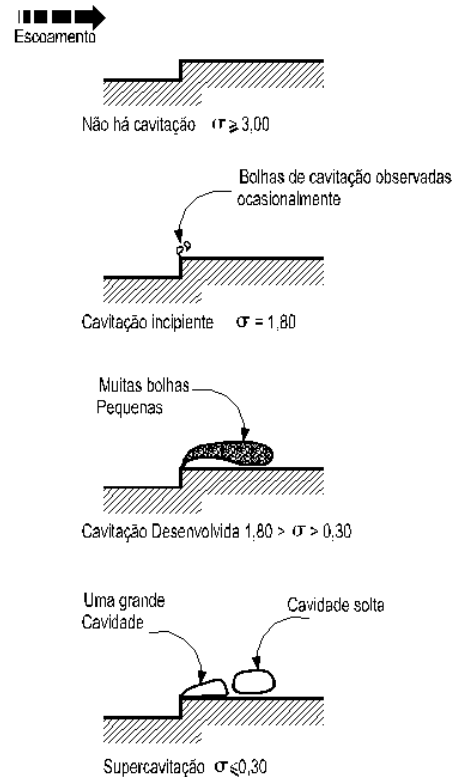


Figura 8. - Desenvolvimento da cavitação.  
Fonte - Falvey (1990).

No entanto, pode ser destacado que o emprego de bomba de maior pressão propiciaria o emprego de bocais de diferentes diâmetros o que permitiria reduzir o valor de ( $\sigma_j$ ) para obter supercavitação. Diversos autores como Ball (1976), Quintela e Ramos (1980), Graham et al (1987) e Falvey (1990) indicam que valores do índice de cavitação menores que 0,3 provocaram desgaste em estruturas hidráulicas. Mas o dano dependia não somente do valor do índice de cavitação, mas também do tempo de exposição da estrutura a fluxos cavitantes, do acabamento da superfície e da geometria, entre outros.



Estima-se que o fator preponderante na determinação da eficiência na operação de desgaste da superfície seja a pressão atuante sobre ela. Com o escoamento permanente da água de um jato, como o apresentado na Figura 2, incidindo na direção normal a uma superfície, os níveis de pressão ( $P_s$ ) gerados são expressos por:

$$P_s = \frac{1}{2} \rho v_c^2 \quad (3)$$

em que ( $P_s$ ) é a pressão incidente na amostra,  $\rho$  é a massa específica do fluido e ( $v_c$ ) é a velocidade do jato.

Níveis moderados de pressão não seriam normalmente adequados para operações de limpeza de superfícies, por exemplo. Em distâncias maiores ao alvo, onde o jato tende a formar gotículas, a pressão de impacto pode ser de magnitude maior que ( $P_s$ ). De acordo com Houlston e Vickers (1978) estudos indicaram que as pressões transientes entre a gotícula de água e uma superfície plana rígida pode ser aproximada pela equação de “golpe de aríete”, em que a pressão ( $P_a$ ) é:

$$P_a = \rho c v_c \quad (4)$$

em que ( $P_a$ ) é a pressão do transitório e ( $c$ ) a celeridade.

Os níveis de pressão gerados com o impacto de um jato cavitante ( $P_b$ ), como o da instalação proposta, são diferentes daqueles gerados pelo impacto de gotículas distintas ( $P_a$ ).

A pressão máxima ( $P_b$ ) desenvolvida quando colapsa uma bolha em um meio fluido incompressível e colapso isotérmico, segundo Johnson et al (1972) citados por Houlston e Vickers (1978), pode ser obtida pela Equação 5 como sendo:

$$P_b = \frac{P_s}{6,35} e^{(\frac{1}{\alpha})} \quad (5)$$

em que ( $\alpha$ ) é a relação entre a pressão de gás dentro da bolha no início de colapso e a pressão ( $P_s$ ) de incidência na amostra.

O valor de  $\alpha = 1$  indica o menor dano devido à cavitação. Para valores de ( $\alpha$ ) superiores a 1 o dano por cavitação é inexistente.

Uma indicação da eficiência do desgaste por cavitação ( $R^*$ ), pode ser obtida tomando-se a razão de ( $P_b$ ) para ( $P_a$ ):

$$R^* = \frac{P_b}{P_a} \quad (6)$$

Para o equipamento tipo jato cavitante deste trabalho serão calculados os valores de ( $P_b$ ) e ( $P_a$ ) para avaliar ( $R^*$ ).

Será considerado que a velocidade do som na água ( $c$ ) é de 1482m/s, à temperatura de 20°C. Deve-se levar em consideração que o valor da celeridade é alterado pela incorporação de ar na água dentro do recipiente do ensaio. De acordo com Jansen et al (1988), no caso da incorporação de ar nos escoamentos, de maneira a prevenir o aparecimento de danos por cavitação, concentrações de ar de 5 a 10 %, próximas às superfícies que se deseja proteger são suficientes para eliminar os riscos da cavitação. Como não foram realizadas medidas de concentração de incorporação de ar no escoamento, adotou-se o valor da celeridade mais conservador.

A velocidade do jato ( $v_c$ ) nos ensaios do equipamento proposto neste trabalho é de 89,3 m/s, para o bocal de 3,00mm. A Equação 4 fornece um valor de ( $P_a$ ) igual a 132,11MPa. No gráfico da Figura 9, com os valores de ( $P_a$ ) e de ( $v_c$ ), obtém-se o valor típico de  $\alpha = 1/4$ . O valor de ( $P_b$ ) pode ser obtido substituindo os valores de ( $P_s$ ) e ( $\alpha$ ) na Equação 5. Desta forma, tem-se que  $P_b=34,2$ MPa. Substituindo-se ( $P_a$ ) e ( $P_b$ ) na Equação 6, calcula-se a eficiência do equipamento que resultou em  $R^*\approx 0,259$ .

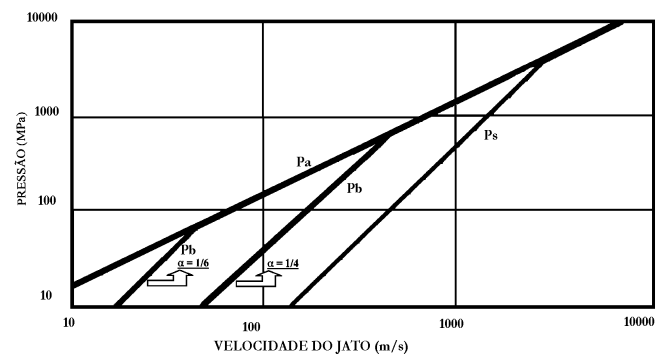


Figura 9 - Níveis de pressão em um jato de água. Fonte-Houlston e Vickers (1978).

Houlston e Vickers (1978) relacionaram a variação de ( $R^*$ ) com o tamanho do orifício, encontrando para a pressão de 20,7MPa e diâmetros de 0,4mm, 0,8mm e 1,6mm, respectivamente, os se-

guintes valores de ( $R^*$ ), 0,023, 0,042 e 0,45. Considerando a variação de ( $R^*$ ) com a pressão e para um orifício de 1,6mm, obtiveram valores de 0,60, 0,45, 0,063 e 0 para valores de pressão de 30,5MPa, 20,7MPa, 13,8MPa e 6,9MPa. Para ( $R^*$ ) = 0, foi verificada a existência de cavitação leve, de forma que não foi constatado dano. O comportamento dos danos devido à cavitação, como se verifica através da variação da eficiência ( $R^*$ ), aumentou com o diâmetro do orifício empregado e também com o aumento da pressão, como era de se esperar.

Comparando-se os valores de eficiência do trabalho de Houlston e Vickers (1978) com o valor obtido neste trabalho, constata-se que a eficiência com o bocal de 3,00mm está coerente com os resultados dos autores. Pode-se concluir que os resultados foram satisfatórios, corroborados pelos desgastes obtidos nas amostras testadas. Porém, a magnitude da pressão deveria ser aumentada para melhorar a eficiência do equipamento e reduzir o valor do índice de cavitação. Também, deve-se desenvolver algum critério que relacionasse a incorporação de ar nos ensaios e o seu efeito nos resultados.

### **Resultados com a instalação de bomba centrífuga**

Iniciaram-se os ensaios sem o uso de bocal, ou seja, com orifício de 9,00mm de diâmetro e distância de 0,05m do bocal até a amostra. A amostra 2 foi retirada e visualizada na lupa de aumento de uma em uma hora. Os ensaios duraram 16 horas nestas condições. Pode-se constatar que não houve sinal de desgaste por cavitação ou por impacto do jato.

Da mesma maneira, realizaram-se os ensaios com o bocal de 7,00mm e também não foi verificado qualquer sinal de desgaste.

Realmente, não foi verificada a existência de cavitação visualmente, através do recipiente transparente. Também, não era possível escutar qualquer ruído que indicasse a existência de cavitação, como ocorreu com a instalação usando a bomba de deslocamento direto.

### **CONCLUSÕES**

As estruturas hidráulicas estão sujeitas à ação de diversos mecanismos que podem colocá-las em situação de risco. O problema de cavitação nestas estruturas é particularmente importante e em especial, as áreas superficiais devem ser resistentes. Portanto, trabalhos de reparo incluem a substituição

daquele concreto por outros, mais resistentes, com características especiais e também tratamento adequado das superfícies.

No estudo experimental desenvolvido neste trabalho foi proposto e testado o equipamento chamado tipo jato cavitante. Com a utilização de bomba de deslocamento direto, os ensaios indicaram que este tipo de equipamento é adequado para a realização de ensaios de resistência à cavitação de concretos. Os tempos necessários para a realização dos testes são curtos, especialmente quando comparados ao dispositivo Venturi, da mesma forma que requer uma área de montagem pequena. Os gastos de energia são inferiores devido ao tempo de operação menor, apesar deste equipamento de jato cavitante requerer uma bomba de alta pressão e, portanto, todos os cuidados inerentes à segurança na operação da instalação.

A utilização de bomba centrífuga em substituição à bomba de deslocamento, na tentativa de se utilizar uma bomba simples e facilmente encontrada no mercado, não se mostrou eficiente, pois não se constatou a presença de cavitação, não havendo danos mesmo após grande número de horas de testes (amostra intacta). Assim, a existência de altas pressões disponíveis é fator necessário para o desenvolvimento da cavitação.

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 deveria se desenvolver algum tipo de transdutor para poder medir as pressões efetivas na saída do bocal e no ponto de impacto da amostra.

O equipamento de pequeno porte e baixo custo permite sua construção sem a necessidade de uma grande área de instalação, elevadas vazões e alto custo como acontece atualmente com o dispositivo tipo Venturi.

Para a indicação de concretos para o uso nas estruturas hidráulicas através de testes com o equipamento tipo jato cavitante, quer seja na fase de construção ou em reparos, sugere-se um estudo de diferentes traços, agregados e adições para verificar a sua adequação. Portanto, os resultados obtidos com as amostras ensaiadas neste trabalho são somente indicativos da eficiência da instalação, pois não teve o intuito de indicar a melhor amostra a ser empregada em concretos de estruturas hidráulicas.

A partir dos ensaios realizados e dos resultados obtidos neste trabalho, é possível propor a normalização dos ensaios de cavitação em concretos.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento desta pesquisa, através de Bolsa de Mestrado (Proc. 00/03611-0) e Auxílio à Pesquisa (Proc. 00/03732-2).

Aos revisores pelas recomendações que vieram a enriquecer este artigo.

## REFERÊNCIAS

- BALL, J.W. Cavitation from surface irregularities in high velocity. **Journal of the Hydraulics Division**, v.102, n. HY9, p.1283-1297, september 1976.
- BONAZZI, A.; FOURNIER, T. La vanne de réglage Monovar. **La Houille Blanche**, Paris, année 43, n.292, p.619-623, juillet/aout 1988.
- BOUDIA, A. et al. Cavitation dans les espaces très confinés: quelques exemples. **La Houille Blanche**, Paris, année 52, n.342, p.64-69, avril/mai 1997.
- CHENG, C.L.; WEBSTER, C.T. e WONG J.Y. Cavitation resistant coatings for concrete hydraulic structures. **ACI Materials Journal**, Detroit, v.87, n.6, p.594-601, nov-dec1990.
- COLGATE, D. Cavitation damage in Hydraulic Structures. In: **International Conference on Wear of Materials**, 1977, St. Louis, april,1977. p.433-438.
- CONN et al. Some unusual applications for cavitating water jets. In: **International Symposium on Jet Cutting Technology**, 7°, 1984, Ottawa. Jet Cutting Technology. Cranfield: BHRA The Fluid Engineering Centre, june,1984. p.1-12.
- DALFRÉ FILHO, J.G. Desenvolvimento de Equipamento para avaliação de erosão por cavitação. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Campinas. Fevereiro de 2002, 97p.
- DALFRÉ FILHO, J.G. ; GENOVEZ, A.I.B. ; LUVIZOTTO JÚNIOR, E. Desenvolvimento de equipamento para avaliação de erosão por cavitação. In: **Congresso Latinoamericano de Hidráulica**, XX, 2002, La Habana. Sessão de trabalho.H.3. (CD-ROM).
- FALVEY, H.T. Cavitation studies in tunnel spillways. In: **Symposium on scale effects in modeling hydraulic structures**, 1984. Ed: Kobus,H. p.5.7-1 a 5.7-5.
- FALVEY, H.T. **Cavitation in Chutes and Spillways**. 1.ed. Denver: United States Bureau of Reclamation, 1990. 145p.
- GIKAS, I. Cavitação-Efeitos sobre superfícies de resina de epóxi e concretos comuns e especiais. **Boletim técnico DAEE**, São Paulo,4(1), p.89-121, jan.-abril 1981.
- GRAHAM, J.R. et al; ACI Committee 210. Erosion of concrete in hydraulic Structures. **ACI Materials Journal**. Detroit, v.84, n.2, p.136-157, mar-abril 1987.
- HOULSTON, R.; VICKERS, G.W. Surface cleaning using water jet cavitation and droplet erosion. In: **International Symposium on Jet Cutting Technology**, 4°, 1978. Jet Cutting Technology. Cranfield: BHRA The Fluid Engineering Centre, apr., 1978. p.H1.1-H1.18.
- JANSEN, ROBERT B. **Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation**. 1.ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1988. 799p.
- KNAPP, R.T.; DAILY, J.W.; HAMMITT, F.G. **Cavitation**. 1 ed. Mac-Graw-Hill, 1970. 578p.
- LICHTAROWICZ, A. Cavitating jet apparatus for cavitating erosion testing. Erosion: prevention and useful applications. **American Society for Testing and Materials**, Philadelphia, STP 664, p. 530-549,1979.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J. **Concreto: Estrutura, Propriedade e Materiais**. 1.ed. São Paulo: PINI, 1994. 573p.
- PINTO, N.L.de S. Model evaluation of aerators in shooting flow. In: **Symposium on scale effects in modeling hydraulic structures**, 1984. Ed: Kobus,H. p.4.2-1 a 4.2-6.
- QUINTELA, C.Q.; RAMOS, C.M. **Proteção contra a Erosão de Cavitação em Obras Hidráulicas**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1980. 73p. (Memória 539).
- TULLIS, J.P. Cavitação em Sistemas Hidráulicos. In: **Intercâmbio Internacional sobre Transientes Hidráulicos e Cavitação**, 1982.
- U. S. BUREAU OF RECLAMATION. **Concrete Manual**. 8.ed. Denver, 1981.

## Equipment for the Simulation of Cavitation Erosion

### ABSTRACT

*Cavitation in hydraulic structures is particularly important and, above all, the surface areas must be resistant. In many cases such great damage is provoked that it reduces the life of the structure and also leads to long interruptions in its use. Cavitation erosion is usually followed by other undesirable effects such as structural vibrations and noise. The objective of this work was to develop equipment to evaluate cavitation erosion in concrete samples used in hydraulic structures. The test bank was assembled using positive displacement and centrifugal pumps. Utilizing the positive displacement pump the test apparatus showed its ability to create cavitation conditions. Therefore the equipment was adequate to perform concrete resistance tests. Visible damage in the specimens was obtained with*

*short testing time and comparison with other devices. It would appear to be a more cost-effective method. The apparatus using the centrifugal pump was not satisfactory. It can be concluded that to obtain cavitation erosion in concrete specimens a combination of test time, features of the specimen (resistance and components) and appropriate values of the cavitation index is necessary. Tests with special concrete specimens are needed to define the best performance in order to achieve efficient construction and repair of the hydraulic structures.*

*Keywords: Cavitation; Erosion; Hydraulic Structures; Experimental Study.*