

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA  
AVALIAÇÃO DE EROSÃO POR CAVITAÇÃO**

**JOSÉ GILBERTO DALFRÉ FILHO**

**Campinas**

**2002**

**UNICAMP**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA  
AVALIAÇÃO DE EROSÃO POR CAVITAÇÃO**

Eng ° José Gilberto Dalfré Filho

**Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ana Inés Borri Genovez**

**Co-orientador: Prof. Dr. Edevar Luvizotto Júnior**

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.

Prof. Dr.

Matrícula:

*Ana Inés Borri Genovez*  
22/08/02  
054721

Campinas, SP

2002

ii

**UNICAMP**  
BIBLIOTECA CENTRAL

20249525

UNIDADE 80  
Nº CHAMADA TUNICOMP  
D1500  
V \_\_\_\_\_ EX \_\_\_\_\_  
TOMBO BCI 51196  
PROC 16.837100  
C \_\_\_\_\_ DY \_\_\_\_\_  
PREÇO R\$ 11,00  
DATA 22-10-02  
Nº CPD \_\_\_\_\_

CM00175007-9

BIBID. 263868

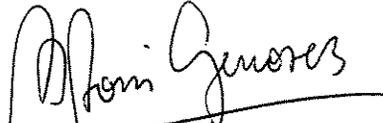
Atento que esta é a versão definitiva  
da dissertação.  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. \_\_\_\_\_  
Matriculad: \_\_\_\_\_

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA  
AVALIAÇÃO DE EROSÃO POR CAVITAÇÃO**

**Eng<sup>o</sup> José Gilberto Dalfré Filho**

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**



**Prof. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Ana Inés Borri Genovez  
Presidente e Orientadora/ FEC-UNICAMP**



**Prof. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Yvone de Faria Lemos de Lucca  
DAEE/EPUSP/FAAP**



**Prof. Dr. Evaldo Miranda Coiado  
FEC-UNICAMP**

Campinas, 27 de fevereiro de 2002.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D152d

Dalfré Filho, José Gilberto

Desenvolvimento de equipamento para avaliação de erosão por cavitação / José Gilberto Dalfré Filho.-- Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientadores: Ana Inês Borri Genovez e Edevar Luvizotto Júnior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Cavitação. 2. Erosão. 3. Estruturas hidráulicas.  
I. Genovez, Ana Inês Borri.  
II. Luvizotto Júnior, Edevar. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. IV. Título.

Dedico este trabalho a meus pais e ao meu irmão, por todo o apoio recebido.

## 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 Professores, Ana Inés e Edevar, que pacientemente, me incentivaram no transcurso destes estudos.

“Árduo, dizem os sábios, é o caminho do conhecimento”

*(Katha Upanishad)*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>LISTA DE FOTOS</b> .....	xii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xiii
<b>RESUMO</b> .....	xv
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 OBJETIVO</b> .....	3
<b>3 CAVITAÇÃO EM ESTRUTURAS HIDRÁULICAS</b> .....	5
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	5
3.2 MEDIDAS DE PROTEÇÃO.....	9
3.2.1 ACABAMENTOS DA SUPERFÍCIE.....	10
3.2.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS RESISTENTES À CAVITAÇÃO.....	15
3.2.3 AERAÇÃO DO ESCOAMENTO NOS ÓRGÃOS DE DESCARGA DAS ESTRUTURAS HIDRÁULICAS.....	17
<b>4 TRATAMENTO ANALÍTICO PARA O INÍCIO DA CAVITAÇÃO</b> .....	23
4.1 NÚCLEOS DE CAVITAÇÃO.....	23
4.2 ÍNDICE DE CAVITAÇÃO.....	29
4.2.1 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE CAVITAÇÃO.....	33
<b>5 PESQUISAS EXISTENTES NA ÁREA DE CAVITAÇÃO</b> .....	37

5.1 EQUIPAMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA CAVITAÇÃO.....	37
5.2 ESTRUTURAS HIDRÁULICAS, MATERIAIS E TÉCNICAS	
EMPREGADOS EM REPAROS.....	48
5.3 CONCLUSÃO.....	52
<b>6 METODOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
6.1 BANCO DE ENSAIO.....	53
6.2 METODOLOGIA DE ENSAIO.....	57
6.3 ENSAIOS.....	59
6.3.1 ENSAIOS COM A INSTALAÇÃO DE BOMBA	
DE DESLOCAMENTO DIRETO.....	59
6.3.2 ENSAIOS COM A INSTALAÇÃO DE BOMBA	
CENTRÍFUGA.....	63
<b>7 RESULTADOS E ANÁLISE.....</b>	<b>65</b>
7.1 RESULTADOS.....	65
7.1.1 RESULTADOS COM A INSTALAÇÃO DE BOMBA	
DE DESLOCAMENTO DIRETO.....	65
7.1.2 RESULTADOS COM A INSTALAÇÃO DE BOMBA	
CENTRÍFUGA.....	74
7.2 ANÁLISE.....	75
7.2.1 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE CAVITAÇÃO NA INSTALAÇÃO.....	75
7.2.2 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO EQUIPAMENTO.....	78
7.2.3 COMPARAÇÃO COM OUTROS EQUIPAMENTOS.....	81
7.2.4 EFEITO DO TEMPO DE ENSAIO E	
DESGASTE NAS AMOSTRAS.....	83
<b>8 CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>93</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1. Especificações de microrugosidades nas superfícies hidráulicas.....	11
Quadro 3.2. Parâmetros de erosão de cavitação.....	12
Quadro 4.1. Valores de $\alpha$ para diferentes tipos de irregularidades.....	32
Quadro 5.1. Especificações dos bocais.....	45
Quadro 5.2. Estruturas que sofreram danos por cavitação.....	51
Quadro 6.1. Amostras de concreto utilizadas nos ensaios.....	62
Quadro 7.1. Evolução dos desgastes nas amostras de concreto.....	73

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Tipos de irregularidades e zonas de provável erosão de cavitação.....	6
Figura 3.2. Configuração das erosões na bacia de dissipação de energia de Novosibirsk; (a) a jusante dos blocos de queda; (b) nos blocos de amortecimento da primeira fiada e a jusante deles.....	7
Figura 3.3. escoamento a jusante dos blocos de queda da Figura 3.2.....	8
Figura 3.4. Pressões e velocidades críticas para ressaltos bruscos (alturas em mm).....	13
Figura 3.5. Pressões e velocidades críticas para ressaltos com arredondamento (alturas em mm).....	13
Figura 3.6. Pressões e velocidades críticas para ressaltos com chanfro.....	14
Figura 3.7. Variação de $\sigma_{cr}$ com a altura de um ressalto brusco.....	14
Figura 3.8. Tipos de aeradores.....	19
Figura 3.9. Suprimento de ar para os aeradores.....	20
Figura 3.10. Dispositivos de aeração (Barragem de Foz de Areia).....	20
Figura 4.1. Comportamento dos núcleos de cavitação em materiais hidrofóbicos e hidrofílicos.....	24
Figura 4.2. Condições de Equilíbrio para cavidades de vapor contendo ar.....	28
Figura 4.3. Contração da seção em um túnel.....	30
Figura 4.4. Identificação do local de referência para o cálculo do índice de cavitação.....	33
Figura 4.5. Formação de jato submerso.....	35

Figura 5.1. Esquema do aparelho desenvolvido por HOULSTON e VICKERS (1978).....	38
Figura 5.2. Bocais utilizados nos testes do aparelho de HOULSTON e VICKERS (1978).....	40
Figura 5.3. Detalhe do aparelho de LICHTAROWICZ (1979).....	41
Figura 5.4. Instalação utilizada nos ensaios de cavitação de GIKAS (1981)-montagem definitiva.....	43
Figura 5.5. Detalhe do difusor utilizado na instalação de GIKAS (1981)-definitivo.....	43
Figura 5.6. Detalhe do orifício CAVIJET, desenvolvido por CONN et al (1984).....	44
Figura 7.1. Erosão nas amostras ensaiadas pelo equipamento tipo jato cavitante.....	74
Figura 7.2. Desenvolvimento da cavitação.....	77
Figura 7.3. Níveis de pressão em um jato de água.....	80
Figura 7.4 (a). Dano por cavitação produzido em dispositivo Venturi.....	84
Figura 7.4 (b). Início do dano no túnel vertedor da barragem Hoover, Nevada.....	84
Figura 7.5. Resistência à cavitação comparativa entre vários materiais.....	86
Figura 7.6. Desenvolvimento de danos em vertedores.....	87

## LISTA DE FOTOS

Foto 6.1. Banco de ensaio utilizado neste trabalho.....	54
Foto 6.2. Válvula de pé e crivo, na tubulação de sucção da instalação.....	55
Foto 6.3. Suportes metálicos para o recipiente de acrílico e tubo flexível de alta pressão.....	56
Foto 6.4. Bomba de deslocamento positivo de três pistões, filtro na sucção, tanque regularizador e manômetro.....	56
Foto 6.5. Bancada de ensaio utilizando a bomba centrífuga.....	57
Foto 7.1. Amostra 1, antes dos ensaios.....	66
Foto 7.2. Amostra 1, tempo de ensaio 30 minutos.....	67
Foto 7.3. Amostra 2, antes dos ensaios.....	68
Foto 7.4. Amostra 2, tempo de ensaio 30 minutos.....	69
Foto 7.5. Amostra 3, antes dos ensaios.....	70
Foto 7.6. Amostra 3, tempo de ensaio 30 minutos.....	71
Foto 7.7. Amostra 4, antes dos ensaios.....	72
Foto 7.8. Amostra 4, tempo de ensaio 30 minutos.....	72

## LISTA DE SÍMBOLOS

- c: celeridade  $(M)^0 (L) (T)^{-2}$   
G: constante  $(M)^0 (L)^0 (T)^0$   
m: massa de gás no núcleo  $(M) (L)^0 (T)^0$   
Pa: pressão do golpe de aríete  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
Pb: pressão de impacto de um jato cavitante  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
Pc: pressão estática absoluta no ponto (c)  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
Pe: pressão no centro do jato  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
Pg: pressão do gás  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
Ph: pressão efetiva no plano do obstáculo  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
Pl: pressão do líquido  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
Plc: pressão do líquido crítica  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
Po: pressão estática em (0)  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
Ps: pressão de um jato incidindo normalmente a uma superfície  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
Pu: pressão efetiva a montante do início da camada limite  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
Pv: pressão de vapor  $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$   
R: raio do núcleo  $(M)^0 (L) (T)^0$   
R\*: eficiência do desgaste por cavitação  $(M)^0 (L)^0 (T)^0$   
Rc: raio crítico do núcleo  $(M)^0 (L) (T)^0$   
Rg: constante do gás  $(M)^{-1} (L)^0 (T)^0$   
Ri,Rf: raios da bolha ao início e ao fim de colapso, respectivamente  $(M)^0 (L) (T)^0$   
S: tensão superficial  $(M) (L)^0 (T)^{-2}$   
T: temperatura  $(M)^0 (L)^0 (T)^0 (K)$

$v_b$ : velocidade no plano do obstáculo  $(M)^0 (L) (T)^{-2}$   
 $v_c$ : velocidade no centro do jato  $(M)^0 (L) (T)^{-2}$   
 $v_h$ : velocidade na altura do obstáculo  $(M)^0 (L) (T)^{-2}$   
 $V_0$ : velocidade do fluido em (0)  $(M)^0 (L) (T)^{-2}$   
 $v_u$ : velocidade a montante do início da camada limite  $(M)^0 (L) (T)^{-2}$   
 $Z_c$ : elevação no ponto (c)  $(M)^0 (L) (T)^0$   
 $Z_0$ : elevação no ponto (0)  $(M)^0 (L) (T)^0$   
 $\alpha$ : relação entre a pressão de gás dentro da bolha  
no início de colapso e a pressão  $P_s$   $(M)^0 (L)^0 (T)^0$   
 $\gamma$ : peso específico do fluido  $(M) (L)^{-2} (T)^{-2}$   
 $\rho$ : massa específica  $(M) (L)^{-3} (T)^0$   
 $\sigma$ : índice de cavitação  $(M)^0 (L)^0 (T)^0$   
 $\sigma_b$ : índice de cavitação fora da camada limite e no plano do  
obstáculo  $(M)^0 (L)^0 (T)^0$   
 $\sigma_c$ : índice de cavitação crítica  $(M)^0 (L)^0 (T)^0$   
 $\sigma_e$ : índice de cavitação para um jato submerso  $(M)^0 (L)^0 (T)^0$   
 $\sigma_h$ : índice de cavitação imediatamente a montante  
do obstáculo e na altura do obstáculo  $(M)^0 (L)^0 (T)^0$   
 $\sigma_u$ : índice de cavitação a montante do obstáculo e  
não sujeito aos efeitos da camada limite  $(M)^0 (L)^0 (T)^0$

## RESUMO

DALFRÉ FILHO, José Gilberto. **Desenvolvimento de Equipamento para Avaliação de Erosão por Cavitação**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, 2002, 97p. Dissertação, Mestrado.

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**

## 1 INTRODUÇÃO

As estruturas hidráulicas estão sujeitas a 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. 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. A área danificada resulta ser maior que a própria irregularidade que a causou, continuando o processo e produzindo danos de maior tamanho. No caso de aparecimento de uma grande área, o mecanismo que a provoca é, sem dúvida, a erosão de um jato de água a alta velocidade.

A escolha adequada de um vertedor, por exemplo, deve levar em conta a combinação de adequação ao projeto, segurança na operação e requerimentos de ordem econômica. Ainda que um bom projeto possa reduzir a severidade da cavitação, freqüentemente o risco da erosão é aceito e os danos provocados minimizados com o emprego de materiais resistentes. A escolha do material adequado é feita, normalmente, levando-se em conta os ensaios realizados nas mesmas condições por algum material padrão, ou seja, aquele em que a resistência à cavitação é conhecida, como citado por LUSCH e EWUNKEM (1992).

O dano devido à cavitação sempre ocorre a jusante da fonte que o provocou. Isto tem, portanto, duas implicações importantes, a primeira é que deve haver uma fonte e a segunda que a cavitação não avança para montante. Dentre as fontes tem-se, por exemplo, irregularidades superficiais, ranhuras de comportas e mudanças bruscas na direção do escoamento. Examinando

a superfície do escoamento de uma estrutura hidráulica, as irregularidades superficiais ou rugosidades podem ser colocadas dentro de duas categorias, a saber, as isoladas ou singulares e as uniformemente distribuídas, que se referem à textura da superfície. Nos dois casos, a cavitação acontece devido à turbulência e a ação que a produz é a mudança brusca na direção do escoamento no local da irregularidade. No caso de irregularidades uniformemente distribuídas na superfície, a cavitação acontece por turbulência localizada e se dá sempre dentro do corpo.

Normalmente, a erosão provocada pelo fenômeno da cavitação vem acompanhada de outros efeitos indesejáveis que são as vibrações estruturais e ruído. Resumidamente, a cavitação é a formação de bolhas ou cavidades em um líquido. Em estruturas hidráulicas, o líquido é água e as cavidades estão preenchidas com vapor de água e ar. As cavidades se formam em um local onde a pressão cai até a um valor que fará com que a água se vaporize à temperatura do ambiente. Essas cavidades ao serem transportadas através de regiões com gradientes de pressão positivos eventualmente implodem. Esses colapsos produzem pressões instantâneas muito altas que impactam na superfície sólida do escoamento. É justamente durante esse processo que pode ocorrer a erosão acompanhada de vibrações e ruído. Pode-se dizer, portanto, que os principais fenômenos de interesse tecnológico ocorrem durante o processo de implosão ou colapso das cavidades, conforme BISTAFA (1994).

Danos podem se desenvolver muito rapidamente, depois de iniciado o processo. Em muitos casos, simplesmente substituir o concreto erodido, pode assegurar o uso imediato da estrutura, porém, não garante de forma alguma, uma boa performance em longo prazo. Portanto, trabalhos de reparo incluem a substituição daquele concreto por outros, mais resistentes, com características especiais e também tratamento das superfícies adequadas. Modificar o projeto ou a operação da estrutura para eliminar os mecanismos de danos, ou todas essas soluções em conjunto podem ser adotadas. Em muitos casos os materiais são utilizados para fazer reparos na estrutura, sem os ensaios de laboratório necessários para testar sua aplicabilidade. Percebe-se desde logo que, esses processos podem ser onerosos e necessitam de estudos prévios para sua aplicação.

## **2 OBJETIVO**

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

### 3 CAVITAÇÃO EM ESTRUTURAS HIDRÁULICAS

Neste capítulo será feita a descrição da formação do fenômeno da cavitação nas estruturas hidráulicas. Também, são relatadas algumas medidas de proteção das estruturas como o acabamento das superfícies, o uso de materiais resistentes e a prevenção do aparecimento do fenômeno da cavitação através da aeração do escoamento.

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os escoamentos nos órgãos de descarga das barragens como vertedores e descargas de fundo de alta queda se fazem, geralmente, com elevadas velocidades. A experiência tem mostrado que os problemas de cavitação neste tipo de escoamento, admitindo as superfícies de concreto definidoras da fronteira com acabamentos adequados, têm lugar para velocidades superiores a 30-35 m/s, dependendo este valor da pressão no escoamento. Em particular nos vertedores e descargas de fundo, encontram-se diversos tipos de irregularidades. Tais microrugosidades podem determinar a ocorrência de cavitação, dependendo do seu tipo, tamanho e da velocidade do escoamento (vide Figura 3.1)

A intensidade de erosão nas superfícies de concreto, por ação da cavitação varia proporcionalmente a uma potência da velocidade situada entre a quinta e a sétima. Desta forma,

consoante o valor considerado para o expoente, a relação entre a intensidade de erosão em superfícies de descarregadores de cheias ou em descargas de fundo é aproximadamente:

- 5 a 11, quando a queda duplica, por exemplo, quando se comparam quedas de 50 e 100m;
- 15 a 46 quando a queda triplica, por exemplo, quando se comparam quedas de 50 e 100m.

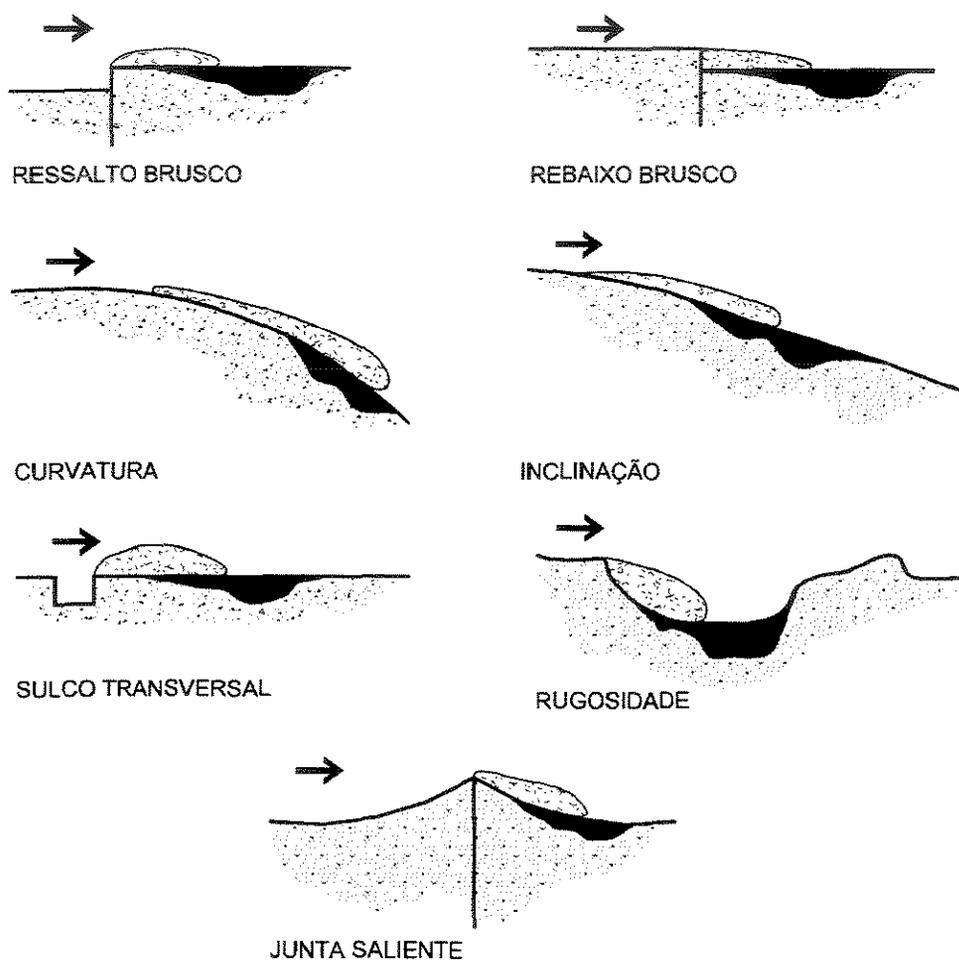


Figura 3.1. Tipos de irregularidades e zonas de provável erosão de cavitação.

Fonte – BALL (1976).



A interpretação de Iuditskii (1965) citado por QUINTELA e RAMOS (1980), para o mecanismo responsável pela formação de depressões que originam a cavitação e a conseqüente erosão em alguns casos é a que segue. A jusante dos blocos de queda formam-se vórtices em forma de ferradura, com as extremidades fechadas sobre a soleira, Figura 3.3. Tais vórtices desprendem-se dos blocos e, a passagem das suas extremidades sobre a soleira, ocorrem depressões que originam a cavitação. Por outro lado, o escoamento ao se aproximar dos blocos de amortecimento, sofre acentuada contração, formando-se junto dos paramentos verticais desses blocos, zonas de separação com vórtices muito instáveis.

Em conseqüência das pulsações, quer da pressão, quer da velocidade do escoamento que atinge os blocos, a veia líquida volta a aderir ao paramento vertical dos mesmos, para descolar de novo e, assim sucessivamente. É assim, de admitir que os deslocamentos bruscos do escoamento do paramento vertical dos blocos originem depressões responsáveis pela cavitação.

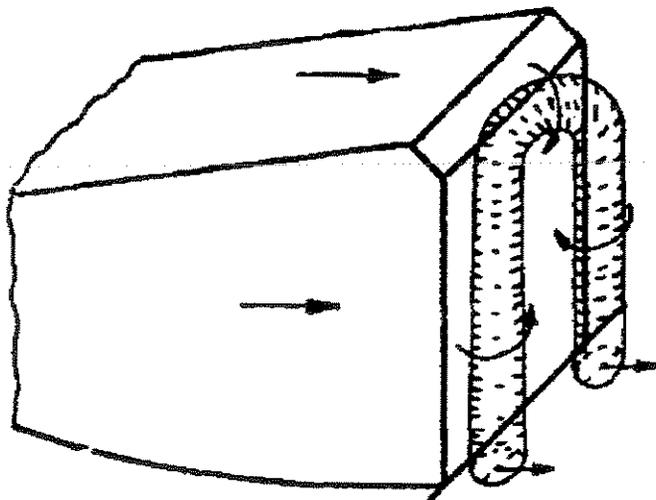


Figura 3.3. Escoamento a jusante para os blocos de queda da Figura 3.2.

A previsão de cavitação incipiente através de medição das flutuações de pressão em modelos hidráulicos de estruturas dotadas de tais blocos, não é considerada adequada, por subestimar o risco de cavitação. Com efeito, não é possível localizar os transdutores nos pontos em que se geram as maiores depressões e que se situam sobre os eixos dos vórtices. Nestas

condições têm sido realizados em laboratório numerosos ensaios em que é detectada não só a cavitação incipiente por observação visual com o recurso da luz estroboscópica ou utilizando transdutores ultra-sônicos, mas também, o desenvolvimento da erosão por cavitação. Esses ensaios tem sido realizados em tanques ou câmeras de cavitação e em túneis de cavitação, tendo os primeiros a vantagem de permitir a formação de ressalto hidráulico e o inconveniente de só possibilitar velocidades de ensaio relativamente baixas de 5 a 10 m/s. Nos ensaios de Rozanov e Kaveshnikov (1973) citado por QUINTELA e RAMOS (1980) , foi utilizado um material capaz de ser erodido pela ação de cavitação nos tanques de cavitação, com a seguinte composição (em peso): 37-40% de gesso; 28-32% de areia de quartzo; 18-23% de cimento Portland e 10-12 % de água.

É freqüente a existência de estruturas submetidas a grandes cargas e equipadas com descargas de fundo munidas de comportas de grandes dimensões que exigem ranhuras que perturbam a continuidade das fronteiras. Nestas situações, as ranhuras provocam descolamentos da lâmina líquida, dando origem a zonas de pressão efetivas negativas capazes de dar lugar a erosão por cavitação. O valor destas pressões depende, além das condições de escoamento, da configuração geométrica das ranhuras. Desta forma, a geometria da ranhura deve ser tal que não provoque zonas com grande abaixamento de pressão. Dado que, como já se referiu, são nas zonas de separação que se originam as pressões mais baixas, as formas em aresta viva, em particular as da aresta de jusante, devem ser tanto quanto possível, evitadas.

### 3.2 MEDIDAS DE PROTEÇÃO

Nos locais dos órgãos de descarga com escoamento sob pressão, a erosão por cavitação pode ser evitada, em muitos casos, mediante a fixação da seção transversal do órgão de descarga. A redução da velocidade e o conseqüente aumento da pressão conjugam-se no sentido favorável ao não aparecimento da cavitação.

Como medidas de proteção contra a erosão de cavitação, provocada pelas irregularidades das paredes dos órgãos de descarga das barragens em escoamentos de superfície livre, com elevadas velocidades, são de destacar as seguintes, segundo QUINTELA e RAMOS (1980):

- Especificações para o acabamento das superfícies de concreto, de forma a que não existam irregularidades capazes de provocar erosão por ação da cavitação;
- Utilização nos trechos mais vulneráveis das superfícies em contato com o escoamento, de concretos especiais, de blindagens, ou de revestimentos do concreto por películas ou camadas protetoras;
- Arejamento da veia líquida em toda a periferia.

A execução de fôrmas que provocam o aumento da pressão na zona de cavitação é também freqüentemente adotada. Em blocos de queda e de amortecimento de bacias de dissipação de energia por ressalto e em blocos dispersores, podem adotar-se formas especiais que provocam um descolamento da veia líquida, com o objetivo de afastar os efeitos da cavitação da fronteira do escoamento (blocos supercavitantes).

### 3.2.1 ACABAMENTOS DA SUPERFÍCIE

Resultados experimentais permitem o estabelecimento de especificações para o acabamento de superfícies de maneira a impedir os efeitos da cavitação resultante de irregularidades.

São de referir 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 relatou BALL (1976) (Quadro 3.1).

Quadro 3.1. Especificações de microrugosidades nas superfícies hidráulicas.

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

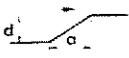
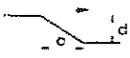
Fonte - “Bureau of Reclamation”,  
citado por BALL (1976).

As especificações requerem ainda que os ressaltos ou rebaixos sejam limitados a 3,2mm e a 6,4mm, dependendo se a superfície é moldada ou não e se a irregularidade é transversal ou não ao escoamento. Quando a irregularidade se localiza a jusante de uma comporta, deve ser totalmente removida.

Oskolkov e Semenkov (1979), citados por QUINTELA e RAMOS (1980), definem também condições de acabamento das superfícies de concreto de soleiras de descarregadores de cheias, necessárias para garantir que irregularidades do tipo ressalto ou rebaixo não dêem origem a erosões de cavitação, observar Quadro 3.2. Também, chamam a atenção para o fato da impossibilidade prática de execução de chanfros com inclinações inferiores a 1:12 e a 1:20, nos casos de ressaltos ou rebaixos com alturas da ordem de 20 a 40mm e de 5 a 20mm. Pela análise

deste quadro verifica-se que estas inclinações apenas impedem erosões por cavitação para cargas inferiores, respectivamente a 50m e a 70m.

Quadro 3.2. Parâmetros de erosão de cavitação.

Carga (m)	Altura da irregulari- dade (mm)	Inclinação dos chanfros		
		Irregularidade transversal		Irregularidade longitudinal
				
40 a 50	5	—	—	—
	5 a 10	1:4	1:8	1:2
	10 a 20	1:8	1:10	1:3
	20 a 40	1:12	1:14	1:3
60 a 70	2,5	—	—	—
	2,5 a 5	1:7	1:11	1:2
	5 a 10	1:14	1:18	1:3
	10 a 20	1:16	1:20	1:3
40 a 100	20 a 40	1:20	1:24	1:3
	10 a 20	1:32	1:38	1:4
	20 a 40	1:36	1:42	1:4

Fonte - Oskolkov e Semenkov (1979), citado por QUINTELA e RAMOS (1980).

As condições de acabamento impostas por qualquer dos valores apresentados são extremamente restritivas e por conseguinte, de execução difícil e onerosa, uma vez que o tratamento das superfícies é feita por esmerilamento das mesmas. Assim, analisando as curvas de BALL (1976) (Figuras 3.4, 3.5 e 3.6), para cargas de alguns metros e velocidades superiores a 35m/s, as tolerâncias são tão restritivas, que se tornam materialmente impossível respeitá-las. Na Figura 3.7 é apresentada a curva da variação do índice de cavitação crítico com a altura de um ressalto brusco

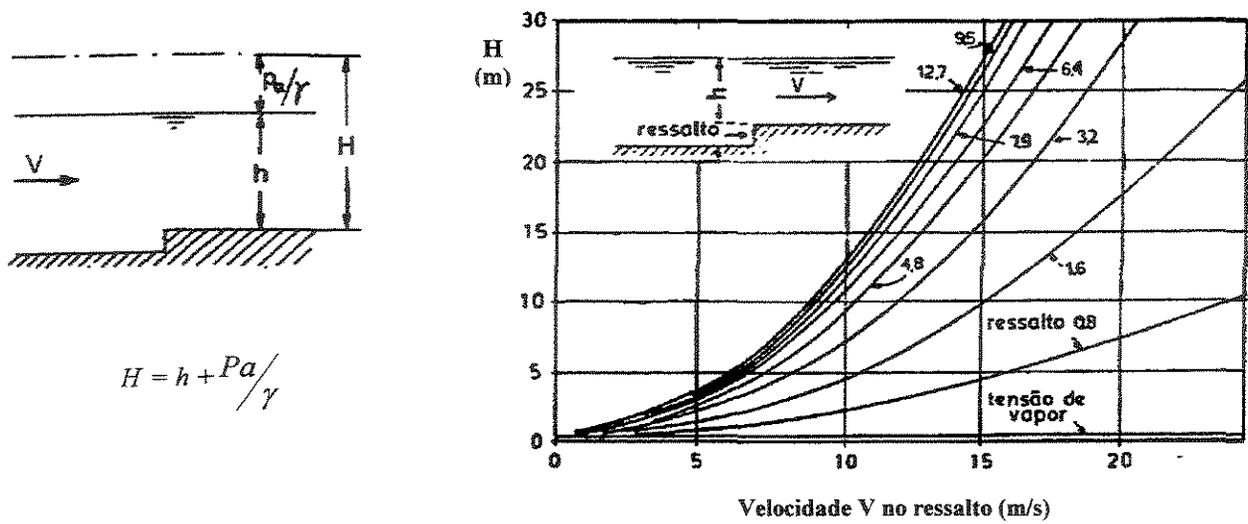


Figura 3.4. Pressões e velocidades críticas para ressalto bruscos (alturas em mm).

Fonte – BALL (1976)

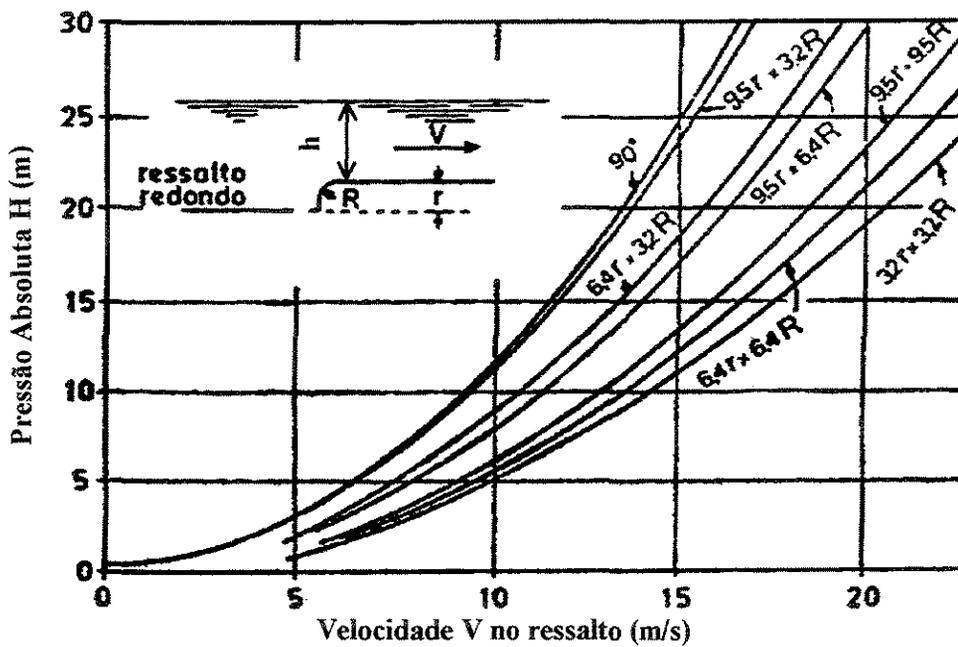


Figura 3.5. Pressões e velocidades críticas para ressalto com arredondamento (alturas em mm).

Fonte – BALL (1976).

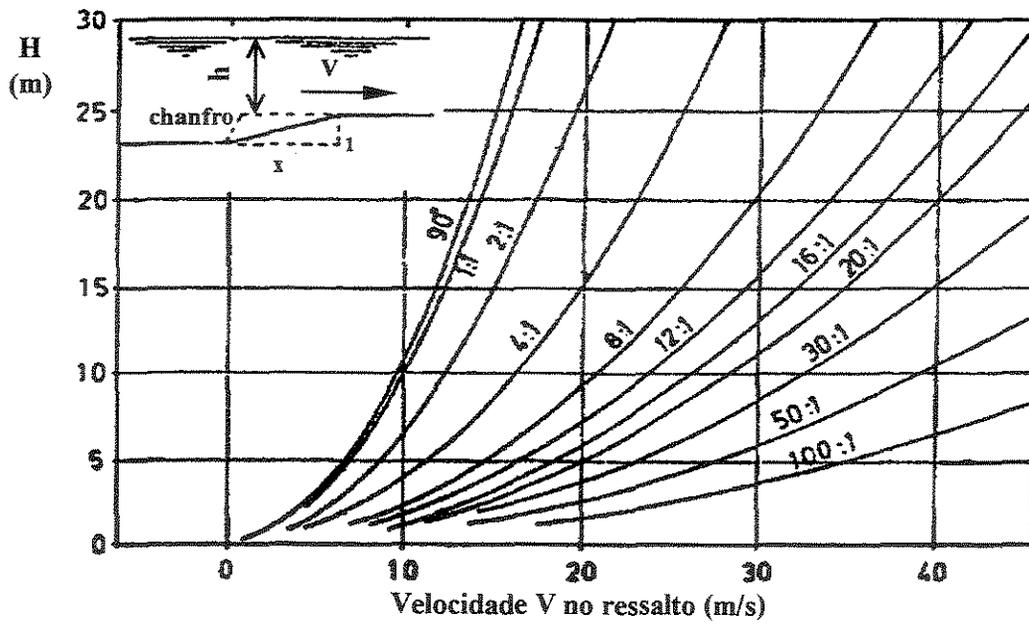


Figura 3.6. Pressões e velocidades críticas para ressalto com chanfro.  
 Fonte – BALL (1976).

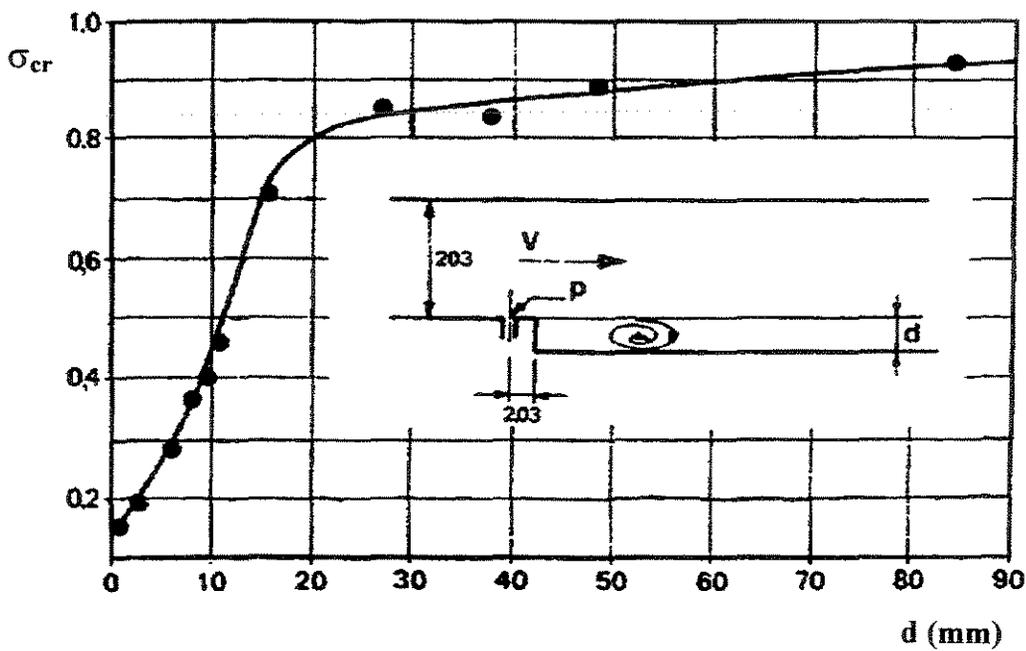


Figura 3.7. Variação de  $\sigma_{cr}$  com a altura de um ressalto brusco.  
 Fonte – JOHNSON (1963) citado por QUINTELA e RAMOS (1980).

Além disso, deve-se levar em consideração que não há garantias contra os efeitos das irregularidades que venham a ser criadas posteriormente devido ao ataque químico das águas agressivas, da ação de agentes climáticos, da abrasão resultante do transporte de sólidos e de quedas de corpos sobre a superfície do concreto. Por exemplo, podemos citar as fissuras devidas as variações térmicas.

Nestas condições apresenta-se como alternativa mais favorável, a adoção de materiais resistentes à erosão por cavitação e/ou o arejamento do escoamento em toda a periferia. Porém, como relata GRAHAM et al (1987), para estruturas antigas, a construção de aeradores pode representar um custo muito alto e também, em estruturas de uso intermitente ou que serão abandonadas depois de servir a um propósito, é necessário escolher adequadamente materiais resistentes para estes fins, evitando-se gastos maiores para utilizar os aeradores.

Como tecnologia de aeração, pode-se utilizar como referência o trabalho de Pinto (1979), em Foz de Areia, citado por JANSEN (1988).

### 3.2.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS RESISTENTES À CAVITAÇÃO.

As propriedades dos materiais que melhor definem a resistência à ação da cavitação são: resistência à tração, ao impacto, a compressão e ao cisalhamento, além da textura (QUINTELA e RAMOS-1980). GIKAS (1981) cita que as melhores correlações para orientar a escolha dos materiais que podem estar sujeitos à cavitação são: coeficiente de elasticidade na ruptura, a dureza, a tensão de ruptura, a tensão de escoamento e a energia de deformação do material, preferencialmente nesta ordem.

De acordo com investigações laboratoriais sobre amostras de concretos em dispositivos Venturi, pode-se concluir que a resistência à erosão é determinada em primeiro lugar pela adesão do aglomerante aos inertes e pela própria coesão do aglomerante. Também, se pode considerar:

- A homogeneidade da estrutura do concreto, ou seja, utilização de grãos dos inertes e do aglomerante dentro de faixas estabelecidas;
- A utilização de inertes ativos do ponto de vista da adesão (tais como calcário e clínquer de cimento);
- Os processos de lançamento do concreto.

GRAHAM et al (1987) recomendam o uso de concretos de alto desempenho de baixa relação água/cimento, utilizando superfluidificantes. Também, o uso de agregados de, no máximo, 38mm de diâmetro, duro, denso, com excelente ligação entre pasta e agregado.

Outros procedimentos também podem ser utilizados para aumentar a resistência das superfícies que definem as fronteiras dos escoamentos, à ação da cavitação.

Assim, pode-se citar QUINTELA e RAMOS (1980), que sugerem o uso das chapas de aço, que fornecem um dos melhores acabamentos. GRAHAM et al (1987) comentam, como exemplo, que placas de aço inoxidável são instaladas sobre o concreto no perímetro a jusante das comportas, e que apesar de sua alta resistência, podem eventualmente sofrer algum dano devido à cavitação. Assim, o projetista deve programar a substituição das chapas de aço nestes locais. Porém, devido ao seu alto custo, às vezes, esses revestimentos são excluídos especialmente onde será necessário recobrir grandes áreas. Os concretos impregnados de polímeros e os concretos de resina epóxi têm resistências a erosão muito superiores àquelas sem essas adições (10 a 100 vezes mais), em alguns casos, aproximando-se a resistência do aço. Dessa forma, são bastante atrativos economicamente.

Outra composição de concreto utilizado é o concreto com fibras, e também a conjugação de concreto com fibras, impregnado de polímeros. DALFRÉ FILHO, GENOVEZ e PAULON (2000), estudaram o desgaste ocasionado por sólidos nas superfícies das estruturas hidráulicas de concreto, empregando concretos com adição de microssílica e nanossílica, assim como identificando a influência do agregado no desgaste sofrido pelas amostras.

No que diz respeito a camadas de proteção de superfícies, a mais eficaz é a aplicação de resina epóxi. Para revestimentos de superfícies metálicas é recomendável a utilização de materiais de elevado grau de absorção de energia elástica de deformação, como neoprene que adere de forma conveniente ao metal, mas isto não é recomendável para o revestimento de concretos.

Os cuidados com o revestimento epóxi são quanto a fixação do mesmo ao concreto. Por exemplo, em locais de temperaturas e de amplitudes térmicas elevadas, os resultados não são satisfatórios. Também, pinturas muito finas de epóxi, retardam a ação da cavitação, mas não a impede. As mesmas formam irregularidades com o desprendimento do material, acentuando os danos devido à cavitação.

### 3.2.3 AERAÇÃO DO ESCOAMENTO NOS ÓRGÃOS DE DESCARGA DAS ESTRUTURAS HIDRÁULICAS

O arejamento, em toda a periferia, de correntes líquidas a elevadas velocidades com a finalidade de proteger o concreto contra a erosão de cavitação, quando esta é provocada por irregularidades das superfícies, constitui uma das mais notáveis inovações, na área das construções hidráulicas.

A solução dos aeradores, evita as especificações severas, de difícil execução, bem como garante a segurança da estrutura contra irregularidades que venham a ser criadas com o tempo. Permite, ainda, com o escoamento a altas velocidades, que se construam juntas de dilatação entre estruturas independentes e dispensa transições suaves a jusante de comportas instaladas em descargas de fundo.

Nos escoamentos com superfície livre, a introdução de ar pode fazer-se naturalmente através da superfície livre, ou mediante dispositivos de arejamento (aeradores), como mostram as Figuras 3.8 e 3.9.

A introdução do ar num escoamento 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.

Embora esta possibilidade de reduzir ou eliminar a erosão de cavitação, por meio do ar arrastado, fosse reconhecida anteriormente à publicação dos resultados de Peterka (1955), citado por QUINTELA e RAMOS (1980), estes constituem a primeira informação quantitativa sobre o problema.

No trabalho de Peterka (1955), o autor verificou que para uma percentagem de volume de ar de 7,4% não foram detectadas perdas de peso em amostras de concreto submetidas a ensaios de cavitação; estas se reduziam muito quando a concentração de ar excedia 2%.

A penetração do ar através da superfície livre de um escoamento até junto da fronteira sólida inferior e a consequente proteção contra a erosão de cavitação são, em geral, limitadas a baixos valores de vazão por unidade de largura.

Surge, assim, como solução a adotar em tais circunstâncias a introdução de ar através de aeradores. Estes dispositivos consistem em ranhuras, degraus ou rebaixos e defletores, combinando-se freqüentemente o último tipo com os primeiros (Figura 3.8).

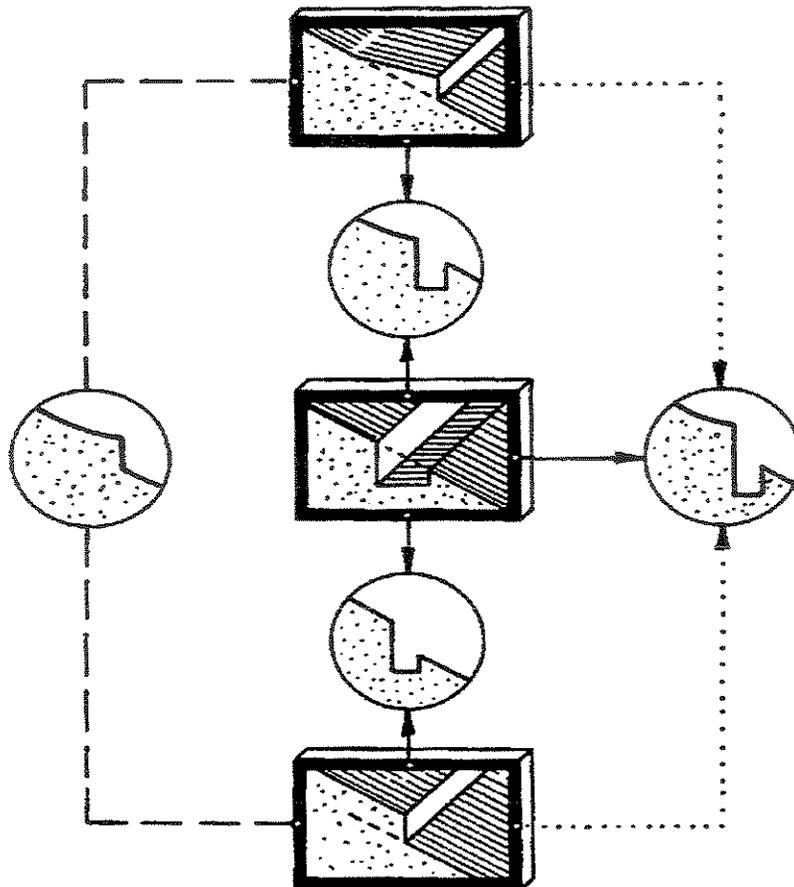


Figura 3.8. Tipos de aeradores.

Fonte - Vischer, Volkart e Siegenthaler (1982),  
citado por GRAHAM et al (1987).

Em certos casos, há a necessidade de recorrer a poços de aeração para assegurar o transporte de ar desde o exterior para os aeradores. A Figura 3.10 mostra o detalhe de um aerador proposto por Pinto (1979), citado por BOUVARD (1997), onde se utilizaram poços de aeração.

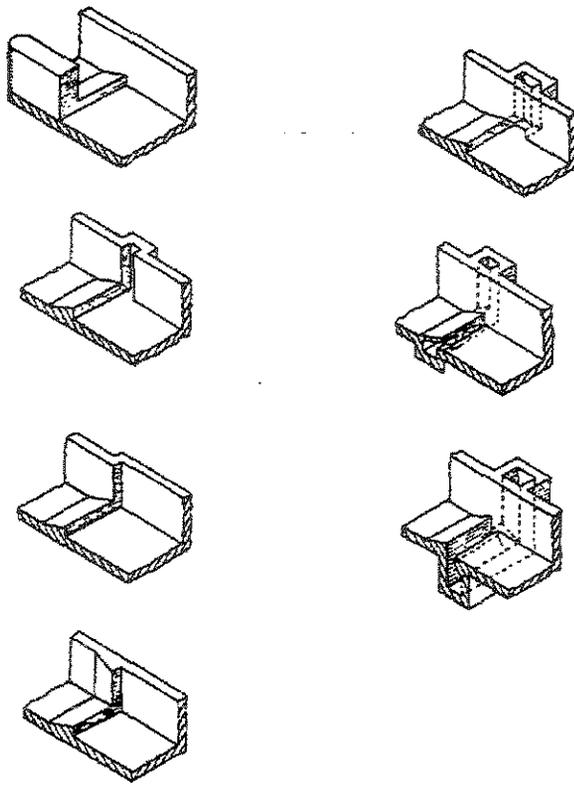


Figura 3.9. Suprimento de ar para os aeradores.

Fonte - FALVEY (1990)

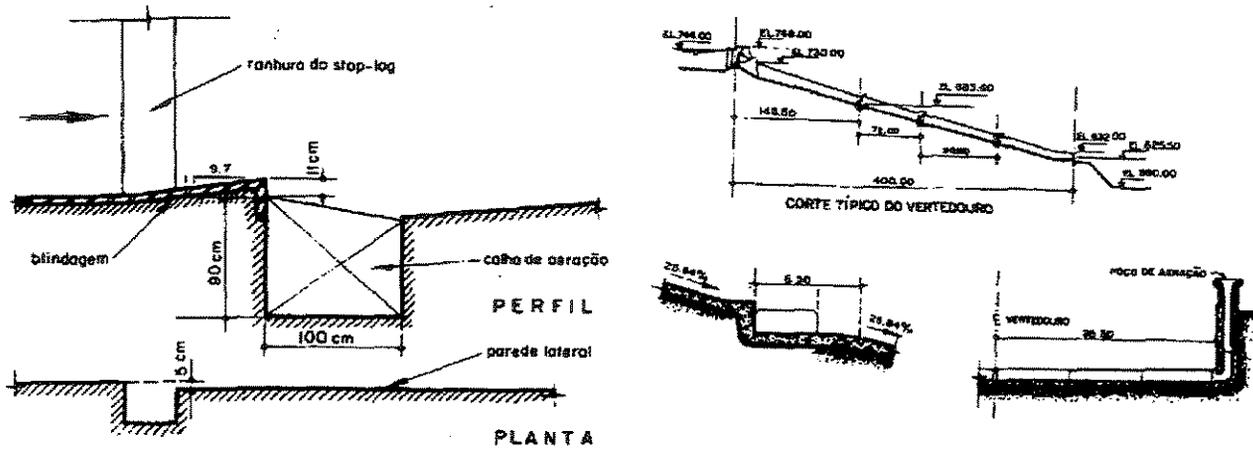


Figura 3.10. Dispositivos de aeração (Barragem de Foz de Areia).

Fonte - Pinto (1979), citado por BOUVARD (1997).

Para maiores referências, uma vez que não é escopo deste trabalho o estudo de aeradores, consultar Pinto (1979), citado por JANSEN (1988) que fornece como proceder com os projetos de aeradores.

## 4 TRATAMENTO ANALÍTICO PARA O INÍCIO DA CAVITAÇÃO

Neste capítulo, será apresentado o tratamento analítico do fenômeno da cavitação, enfatizando algumas equações e parâmetros necessários a compreensão deste fenômeno.

### 4.1 NÚCLEOS DE CAVITAÇÃO

BISTAFA (1994) apresentou equacionamento pertinente ao assunto relacionado a formação de cavidades no líquido, relatado a continuação.

Tipicamente, os líquidos e em particular a água, utilizada em sistemas fluido-mecânicos, não é pura. Medidas indiretas de tensões de tração em água previamente pressurizada a fim de reduzir ou eliminar bolhas de ar existentes indicam valores de 2,5atm. Para água sem qualquer tratamento prévio de pressurização não se conseguiu tracioná-la. Isto leva a crer que existem pontos fracos nos líquidos ordinários que eliminam a sua capacidade de resistir à tração. Estes pontos fracos recebem o nome de núcleos de cavitação, devido ao fato de que é a partir deles que o líquido se rompe formando cavidades. Dentre as várias formas de núcleos de cavitação propostas, aquelas que parecem ser as mais atuantes são: bolhas de ar, bolsas de ar alojadas em impurezas e em irregularidades superficiais das estruturas hidráulicas.

Porém, a forma que parece fazer com que tais núcleos se estabilizem contra qualquer tratamento que se faça à água, é aquela de bolsas de ar em materiais hidrofóbicos. A Figura 4.1 auxilia na compreensão da estabilidade dos núcleos de cavitação em tais materiais.

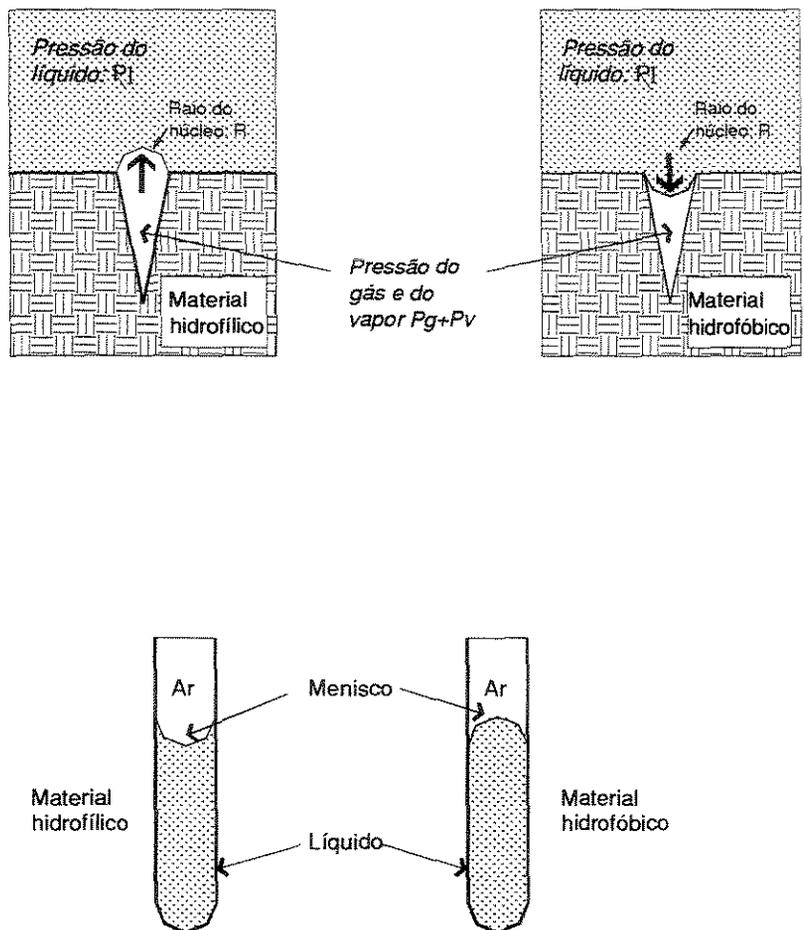


Figura 4.1. Comportamento dos núcleos de cavitação em materiais hidrofóbicos e hidrofílicos.

Fonte - adaptado de BISTAFA (1994).

Para o equilíbrio estático da bolsa com gás e vapor no material hidrofóbico tem-se:

$$P_g + P_v + \left(2 \frac{S}{R}\right) = Pl, \text{ sendo:} \quad (4.1)$$

$S$ : tensão superficial.

No material hidrofílico tem-se:

$$P_g + P_v - \left(2 \frac{S}{R}\right) = Pl. \quad (4.2)$$

Comparando estas duas expressões, observa-se que com o aumento da pressão do líquido ( $Pl$ ), a tensão superficial aumenta com a diminuição do raio ( $R$ ) da bolha de gás, fazendo com que esta tensão tenda a infinito à medida que ( $R$ ) tenda a zero. Este fato leva ao desaparecimento da bolsa no material hidrofílico e à sua perpetuação (embora com raio ( $R$ ) menor) no material hidrofóbico.

Em experimentos em túnel de cavitação observa-se que nos materiais hidrofóbicos (polietileno, teflon, etc) a cavitação observada é bastante dependente de núcleos superficiais; já nos materiais hidrofílicos (vidro, aço inox, etc) a cavitação observada depende de núcleos presentes no escoamento. Portanto, mesmo sob condições bastante adversas é possível garantir a existência de núcleos de cavitação para a grande maioria dos escoamentos de interesse tecnológico. Tais núcleos eliminam a capacidade do líquido de resistir à tensões de tração, fazendo com que apareçam cavidades quando este ainda se encontra submetido à tensões de compressão, ou seja, a pressões.

Tendo garantido a existência quase que universal dos núcleos de cavitação em escoamentos de interesse tecnológico, deseja-se saber em que condições este núcleo se instabiliza gerando cavidades maiores. Para tanto se considere um núcleo esférico contendo gás (em geral

ar) à pressão ( $P_g$ ) e, eventualmente, vapor do líquido circundante à pressão ( $P_v$ ), estabilizado pela ação da tensão superficial ( $S$ ), que se desenvolve na parede da bolha e pela ação da pressão externa do líquido ( $P_l$ ), conforme mostra a Figura 4.2.

Para o equilíbrio estático do núcleo, a equação que fornece o balanço de forças deve ser satisfeita, desta forma:

$$\pi R^2 (P_v + P_g) = 2\pi R S + \pi R^2 P_l, \text{ onde:} \quad (4.3)$$

$R$ : raio do núcleo de cavitação.

A Equação (4.3) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P_v + P_g = \left( 2 \frac{S}{R} \right) + P_l. \quad (4.4)$$

Assumindo que o gás dentro do núcleo se comporte como gás perfeito, a Equação (4.4) resulta:

$$P_l - P_v = \left( \frac{GT}{R^3} \right) - \left( 2 \frac{S}{R} \right), \text{ sendo:} \quad (4.5)$$

$G$ :  $(3/4 \pi) R g m$ , sendo:

$Rg$ : constante do gás;

$m$ : massa de gás no núcleo;

$T$ : temperatura.

A Figura 4.2 mostra uma família de curvas que satisfazem a equação para o equilíbrio estático do núcleo. Ao reduzir-se a pressão do líquido ( $Pl$ ) o núcleo cresce para um novo raio de equilíbrio ( $R$ ) ao longo da curva correspondente ao conteúdo do gás existente dentro do núcleo. Eventualmente, atinge-se um valor da pressão no líquido abaixo da qual não existe um raio que satisfaça a equação de equilíbrio no núcleo. Matematicamente esta situação é representada pela condição:

$$\frac{dR}{d(Pl - Pv)} = \infty; \quad (4.6)$$

que fornece o raio crítico ( $Rc$ ) do núcleo, dado por:

$$Rc = \frac{4}{3} \left( \frac{S}{Pv - Plc} \right), \text{ sendo:} \quad (4.7)$$

$Plc$ : pressão do líquido crítica.

A apresentação feita fornece uma boa idéia a respeito do mecanismo de formação da cavitação. Por exemplo, no caso de um núcleo, com pouco gás dissolvido, ser transportado para uma região de baixa pressão, o seu raio fica praticamente constante. Porém, se a pressão do líquido for suficientemente reduzida, o núcleo atinge o chamado raio crítico, a partir do qual há o crescimento explosivo do núcleo. O rápido crescimento que se verifica então só será possível através da vaporização do líquido na interface ocorrendo, portanto, o processo de cavitação vaporosa. Na Figura 4.2 o lugar geométrico dos raios críticos para os diversos valores de massa de gás no núcleo, está representado pela linha tracejada. Observar que no caso de um núcleo, com grande quantidade de gás, ser transportado para uma região de baixa pressão, o núcleo poderá sofrer uma expansão contínua sem, contudo atingir o raio crítico. Nesta situação, o crescimento do núcleo é devido principalmente à expansão do gás. Este crescimento não explosivo do núcleo

é característico da chamada cavitação gasosa que, em geral, não provoca os efeitos maléficos verificados na chamada cavitação vaporosa. Finalmente, cabe observar que a pressão crítica ( $P_{lc}$ ), para o crescimento explosivo do núcleo se situa em torno do valor da pressão de vapor ( $P_v$ ) do líquido conforme mostra a Figura 4.2. Desta forma, a assertiva de que a cavitação inicia-se quando a pressão do líquido atinge o valor de sua pressão de vapor, está muito próxima da realidade dos fatos.

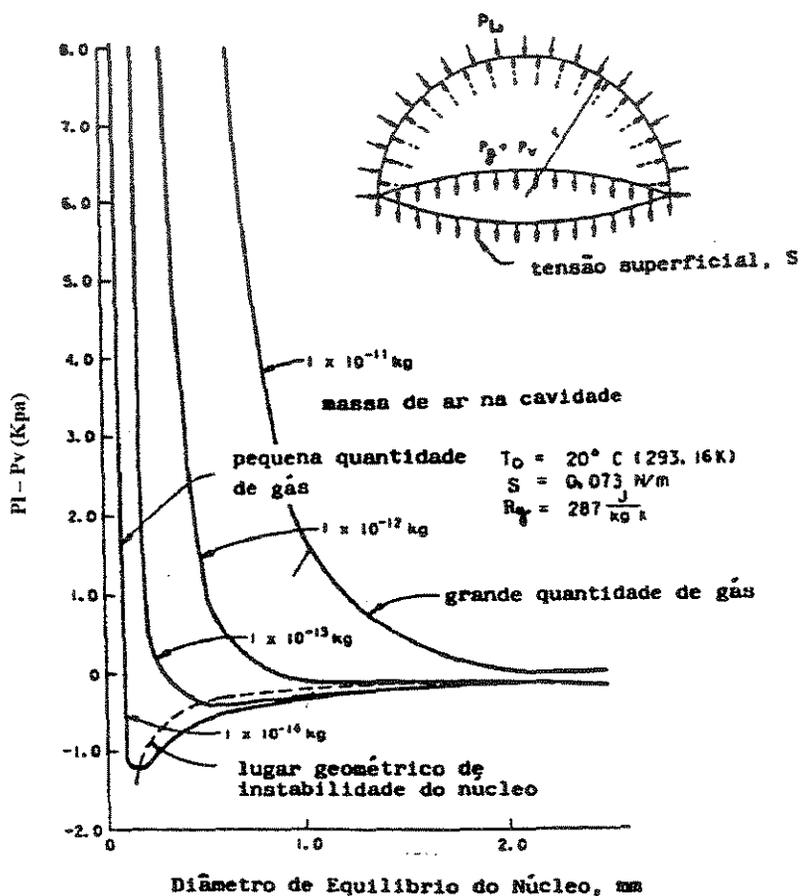


Figura 4.2. Condições de equilíbrio para cavidades de vapor contendo ar.

Fonte - BISTAFA (1994).

## 4.2 ÍNDICE DE CAVITAÇÃO

Quando a geometria da fronteira de escoamentos causa curvas ou convergências às linhas de corrente, a pressão cai ao longo das linhas de corrente convergentes. Por exemplo, a Figura 4.3 mostra a contração de um túnel no qual uma nuvem de cavidades pode começar a formar-se do ponto (c) e então colapsar no ponto (d). A velocidade próxima ao ponto (c) é muito maior que a média das velocidades no túnel a jusante, e as linhas de corrente próximas ao ponto (c) são curvas. Então, para certos valores de vazão e pressão no túnel no ponto (0), a pressão local próxima ao ponto (c) cairá até a pressão de vapor da água e cavidades vão ocorrer. Danos por cavitação são produzidos quando cavidades de vapor implodem. Os colapsos que ocorrem próximos ao ponto (d) produzem altíssimas pressões instantâneas que impactam com a superfície da fronteira do escoamento e causa “pitting”, ruído e vibração. O “pitting” (cavidades nas superfícies devido a implosão das bolhas de vapor), é diferente do aspecto “gasto” da superfície, quando sofreu ataque por erosão devido a mistura água-sólido. Os “pits” cortam em torno do agregado graúdo do concreto e tem arestas irregulares e ásperas.

O índice de cavitação é uma medida adimensional usada para caracterizar quão suscetível é um sistema para cavitatar. A Figura 4.3 ilustra o conceito do índice de cavitação. Neste sistema, o local crítico para cavitatar é o ponto (c).

A pressão estática do fluido no ponto (1) será:

$$P_c + \gamma(Z_c - Z_0), \text{ sendo:} \quad (4.8)$$

$P_c$ : pressão estática absoluta no ponto (c);

$\gamma$ : peso específico do fluido;

$Z_c$ : elevação no ponto (c);

$Z_o$ : elevação no ponto (0).

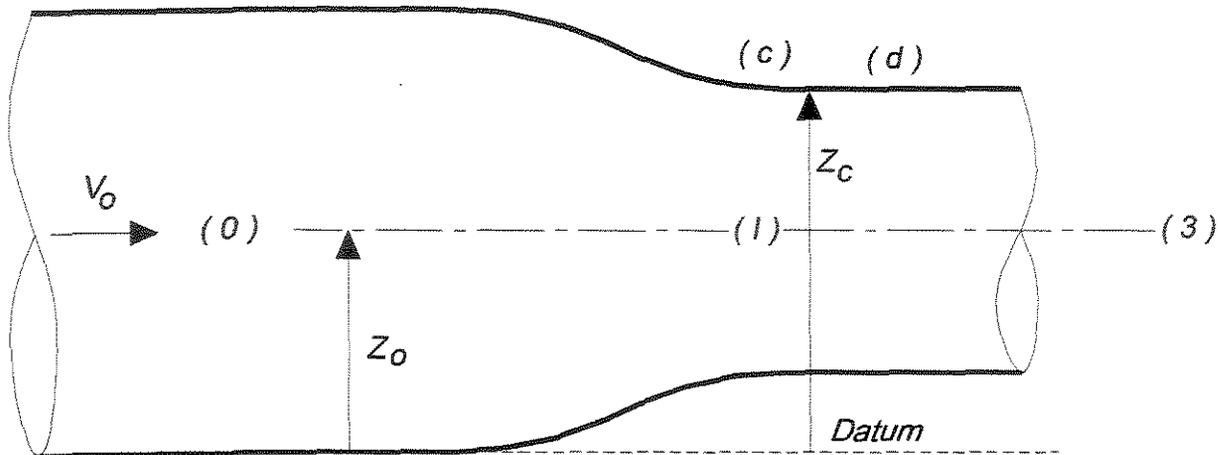


Figura 4.3. Contração da seção em um túnel.

Fonte - GRAHAM et al (1987).

A queda de pressão no fluido assim que se move do ponto (0) até o ponto (1) será:

$$P_o - [P_c + \gamma(Z_c - Z_o)], \text{ sendo:} \quad (4.9)$$

$P_o$ : pressão estática em (0).

O índice de cavitação  $\sigma$  normaliza esta queda de pressão até a pressão dinâmica

$\frac{1}{2}\rho V_o^2$ . Assim:

$$\sigma = \frac{P_0 - [P_c + \gamma(Z_c - Z_0)]}{\frac{1}{2}\rho V_0^2}; \text{ sendo:} \quad (4.10)$$

$\rho$  : massa específica;

$V_0$  : velocidade do fluido em (0).

Se a cavitação está apenas começando e existe uma bolha de vapor no ponto (c), a pressão no fluido adjacente a bolha é aproximadamente a pressão dentro da bolha, que é a pressão de vapor ( $P_v$ ) do fluido, na sua temperatura.

Então, a queda de pressão ao longo das linhas de corrente de (0) até (1), requerida para produzir cavitação é:

$$P_0 - [P_v + \gamma(Z_c - Z_0)]; \quad (4.11)$$

E o índice de cavitação na condição de cavitação incipiente é:

$$\sigma_c = \frac{P_0 - [P_v + \gamma(Z_c - Z_0)]}{\frac{1}{2}\rho V_0^2}. \quad (4.12)$$

Pode ser deduzido então da mecânica dos fluidos e confirmado experimentalmente, que em um dado sistema, a cavitação começa em um ( $\sigma_c$ ) específico, não importando qual combinação de pressão e velocidade atinja ( $\sigma_c$ ).

Se o sistema opera em um  $(\sigma)$  acima de  $(\sigma_c)$ , o sistema não cavita. Se o  $(\sigma)$  está abaixo de  $(\sigma_c)$ , quanto menor o valor de  $(\sigma)$ , mais severa será a ação da cavitação neste sistema. Portanto, o projetista deve estar certo de que o  $(\sigma)$  em que o sistema opera esteja acima de  $(\sigma_c)$  daquele sistema em particular.

Valores de  $(\sigma_c)$  diferem muito, dependendo da forma da fronteira sólida onde se dá o escoamento, da forma dos objetos instalados no escoamento, e do local onde a pressão de referência e a velocidade são medidas.

Por exemplo, para superfícies lisas, com mudanças suaves de declividade na direção do escoamento, o valor de  $(\sigma_c)$  poderá ficar abaixo de 0,2. Para sistemas que produzem fortes vórtices,  $(\sigma_c)$  pode exceder 10. Desde que, em teoria, um dado sistema com dada geometria possui um certo  $(\sigma_c)$ , a despeito das diferenças de escala,  $(\sigma_c)$  é um conceito muito útil nos estudos de modelos. No Quadro 4.1, estão listados alguns valores de  $(\sigma_c)$ , para diferentes tipos de irregularidades.

Quadro 4.1. Valores de  $(\sigma_c)$ , para diferentes tipos de irregularidades.

Estrutura ou irregularidade	$(\sigma_c)$
Estreitamento de um túnel	1,5
Expansão repentina de um túnel	0,19
Blocos dispersores	1,4 e 2,3
Comportas e ranhuras de comportas	0,2 a 3,0
Concreto erodido (prof. max de 3/4")	0,6

Fonte - GRAHAM et al (1987).

#### 4.2.1 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE CAVITAÇÃO

Nas situações práticas, o índice de cavitação depende do local de referência, como mostrado na Figura 4.4. De acordo com FALVEY (1990) três diferentes locais são notados, o que corresponderia a três maneiras diferentes de avaliar o índice de cavitação. São estas:

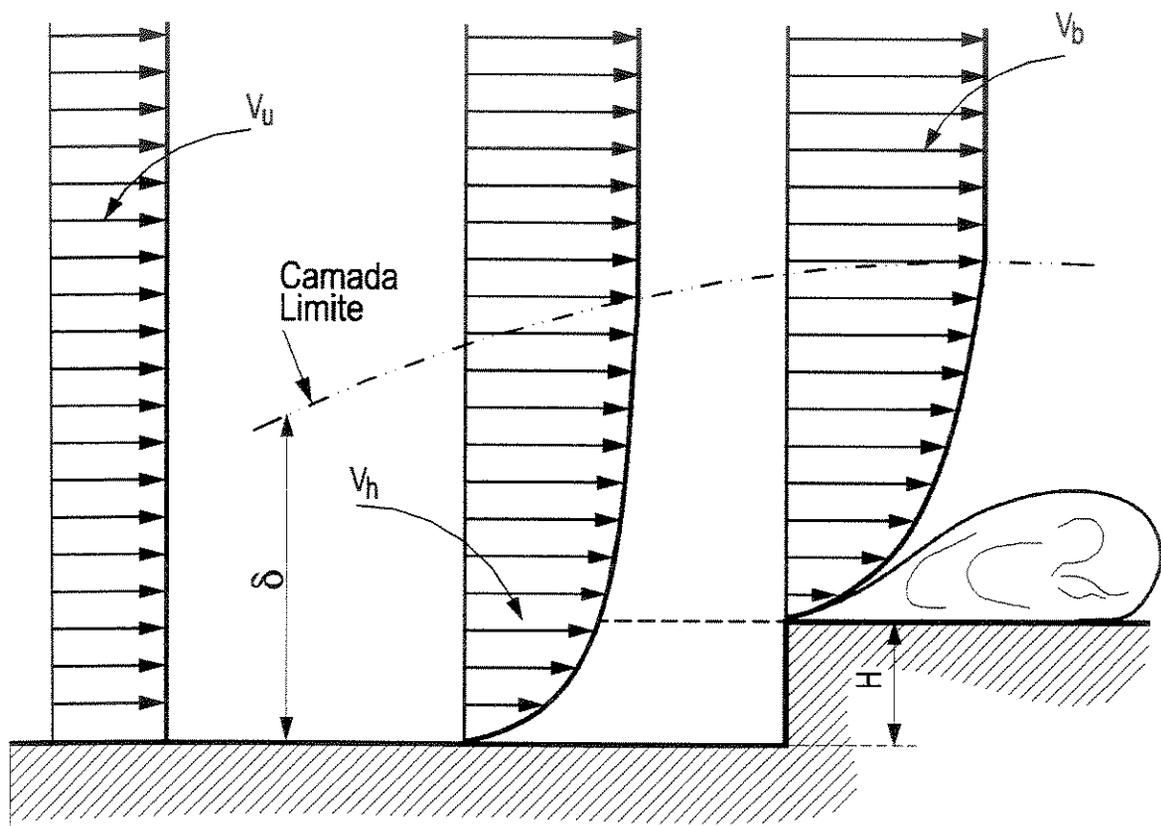


Figura 4.4. Identificação do local de referência para o cálculo do índice de cavitação.

Fonte - FALVEY (1990).

A) A montante dos obstáculos e não sujeito aos efeitos da camada limite:

$$\sigma_u = \frac{P_u - P_v}{\rho v u^2 / 2} \quad (4.13)$$

B) Imediatamente a montante do obstáculo e na altura equivalente a do obstáculo:

$$\sigma_h = \frac{P_h - P_v}{\rho v h^2 / 2} \quad (4.14)$$

C) Fora da camada limite e no plano do obstáculo:

$$\sigma_b = \frac{P_h - P_v}{\rho v b^2 / 2} \quad (4.15)$$

Sendo:

$P_h$ : pressão efetiva no plano do obstáculo;

$P_u$ : pressão efetiva a montante do início da camada limite;

$P_v$ : pressão efetiva do vapor da água;

$v_b$ : velocidade no plano do obstáculo;

$v_h$ : velocidade na altura do obstáculo

$v_u$ : velocidade a montante do início da camada limite.

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 proposto para o caso de um jato submerso (Figura 4.5), ( $\sigma_j$ ) é dado por:

$$\sigma_j = \frac{P_e - P_v}{\rho v_e^2 / 2}, \text{ sendo:} \quad (4.16)$$

$P_e$ : pressão efetiva no centro do jato;

$v_e$ : velocidade no centro do jato.

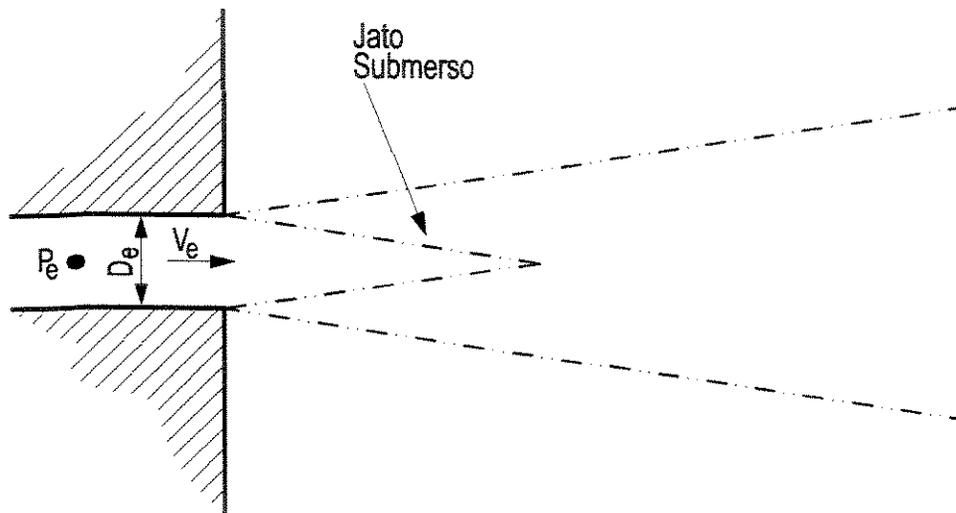


Figura 4.5. Formação de jato submerso.

Fonte - FALVEY (1990).

Conclui-se que para a avaliação correta do índice de cavitação é necessário identificar as condições de referência, que sejam mais facilmente medidas.

## 5 PESQUISAS EXISTENTES NA ÁREA DE CAVITAÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as pesquisas efetuadas para a quantificação da erosão por cavitação. O tratamento será feito dividindo o capítulo em duas partes. Na primeira parte, serão apresentados os equipamentos utilizados para avaliação do dano por cavitação. Na segunda parte, serão destacadas algumas estruturas que sofreram danos por cavitação e também, materiais e técnicas utilizados para reparos.

### 5.1 EQUIPAMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA 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, apresentado na Figura 5.1, 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. Óleo é suprido ao intensificador cilíndrico. A potência gerada é de 38 kW

(50 hp) a pressão de 13,8 MN/m<sup>2</sup>. Assim que o pistão move, a água entra através do cilindro de água em “F”, através da válvula “A”. A água já presente no cilindro em “G” é suprida à pressão máxima de trabalho para o orifício pela válvula “D”. As válvulas “B” e “C” são mantidas fechadas pela pressão na linha do orifício “G”, “D”. No retorno o impacto abre as válvulas “B”, “C”, enquanto que “A” e “D” fecham. Um acumulador “R” no circuito de água reduz a pressão surgida ao fim de cada impacto.

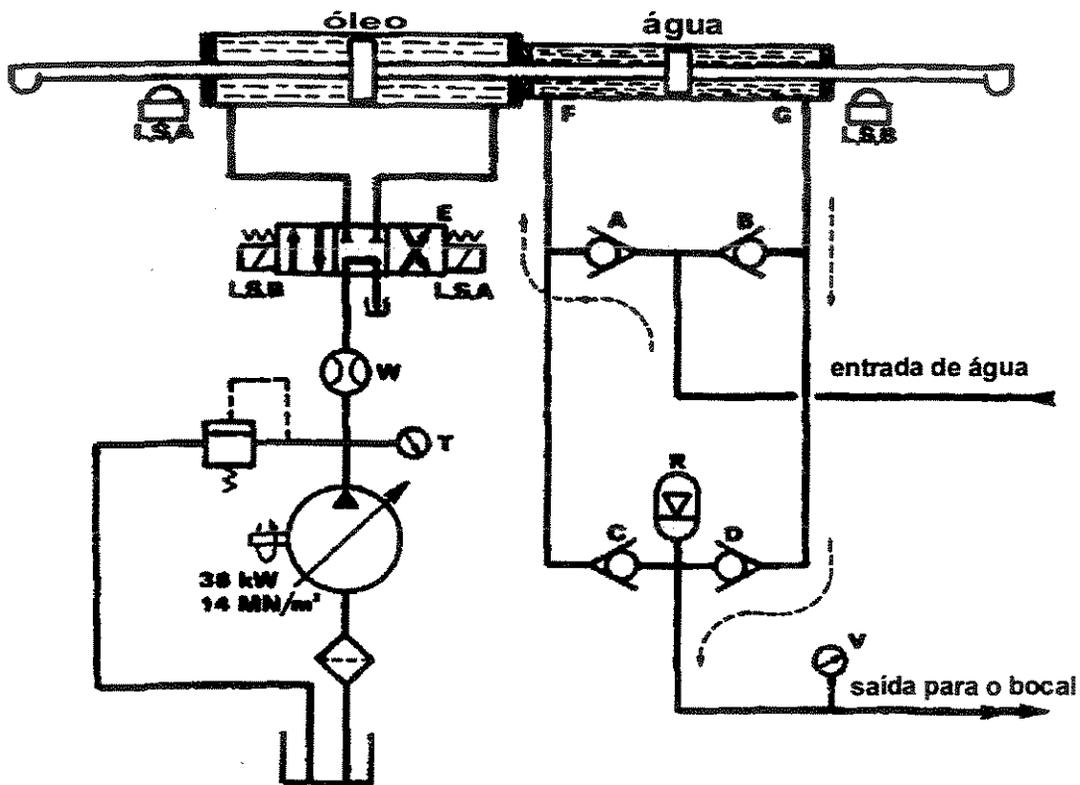


Figura 5.1. Esquema do aparelho desenvolvido por HOULSTON e VICKERS (1978).

Os autores chamam a atenção para o fato de que em uma amostra posicionada a, aproximadamente vinte diâmetros do orifício, o colapso das cavidades de vapor no jato, gera tensões altas na superfície da amostra. Porém, nem toda evidência experimental corrobora a idéia de que a erosão devida a cavitação de um jato fosse maior que uma obtida a uma distância maior (menos crítica), onde o jato se ‘romperia’ em distintas gotículas do líquido.

Apesar da forma dos bocais utilizados na pesquisa influenciarem as conclusões acima, deve-se lembrar que, mesmo com bocais de formas similares, o jato cavitante será formado dentro de limites de combinações de diâmetros e velocidades. Se a potência requerida para produzir um jato de velocidade fixa varia com o quadrado do diâmetro do bocal e em alguns casos, varia diretamente com o diâmetro do bocal, poderia se imaginar que vários orifícios minúsculos seriam superiores a um único orifício de diâmetro maior, para a mesma potência requerida. Porém, se o dano devido à cavitação em relação a minúsculas gotas de líquido é significativamente influenciado pela velocidade do jato e pelo diâmetro, uma série de minúsculos orifícios poderiam não ser a melhor solução. Essas constatações foram o objeto de estudo destes autores.

Os diagramas esquemáticos dos orifícios encontram-se na Figura 5.2. Cada tipo de bocal utilizado pelos autores foram feitos nos diâmetros de 0,4mm, 0,8mm, 1,6mm e 3,2mm. Como resultados, os autores descreveram dois picos ocorridos na eficiência de erosão e penetração. Um primeiro pico mais estreito devido ao dano por cavitação enquanto um segundo, maior, devido às gotículas. Os danos devido às gotículas de água foram maiores em quase todos os casos estudados, tendo os danos por cavitação com relação às gotículas aumentado com o diâmetro e a pressão. Também, a eficiência de penetração aumenta com a diminuição do diâmetro, enquanto que a erosão diminui.

Os maiores danos devidos à cavitação ocorreram no uso do bocal logarítmico e no bocal cônico de  $112^\circ$ , enquanto que os bocais cônicos de  $40^\circ$  e hemisféricos ficaram muito abaixo, apesar de lembrarem os autores que mesmo com bocais bem projetados, a cavitação somente ocorre para certas combinações de diâmetro e velocidade.

LICHTAROWICZ (1979) utilizou equipamento de ensaio no qual um jato submerso é utilizado para erodir uma amostra (Figura 5.3). 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. À medida que a diferença de pressão é aumentada, a região cavitante se estende em comprimento até que eventualmente suplantar o orifício. Neste instante, dependerá apenas da

pressão a montante (e da pressão de vapor que é constante e pequena). O orifício é dito, então, supercavitante. Vale destacar que o orifício não sofre danos, pois a implosão das bolhas ocorre a jusante dele. A cauda cavitante que emerge do orifício parece estática no tempo e espaço. A aparência e o ruído produzidos dependem muito do número de cavitação e do conteúdo de ar no líquido usado.

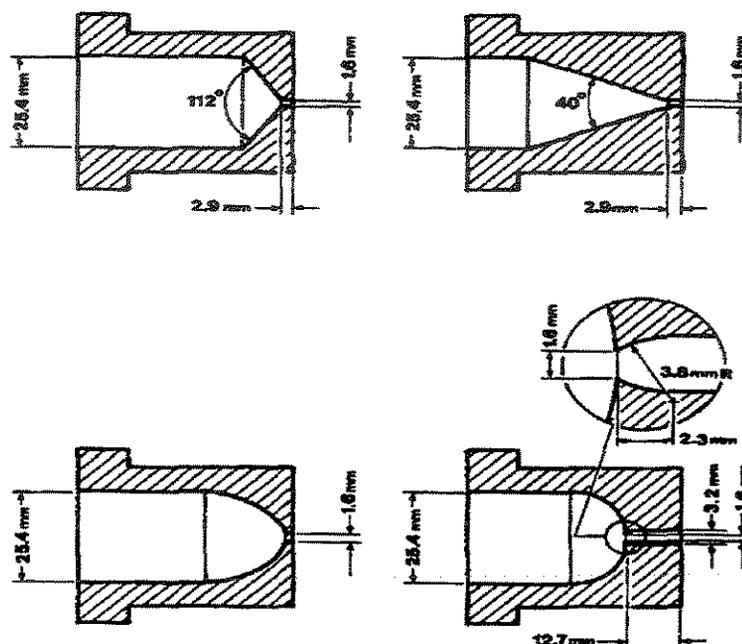


Figura 5.2. Bocais utilizados nos testes do aparelho de HOULSTON e VICKERS (1978)

O pesquisador dividiu as variáveis que afetam a intensidade de cavitação, por conseguinte a taxa de erosão, em dois grupos. O primeiro grupo de variáveis consiste nos parâmetros geométricos: diâmetro do bocal, distância da amostra ao bocal e dimensões da câmara. O tamanho do bocal foi determinado de acordo com a capacidade da bomba disponível e foi mantido constante durante todo o tempo de ensaio. Apenas a distância da amostra foi variada de forma a obter o ponto ótimo. As dimensões da câmara, que são o diâmetro e a espessura, foram feitas suficientemente largas para não afetar o padrão de escoamento à medida que a distância era alterada. Uma modificação foi feita quando se percebeu que para pressões de montante maiores, a área erodida cobria toda a amostra. Assim, aumentou-se o diâmetro das amostras. O segundo grupo, descrevem as condições de operação, tais como pressões a montante

e a jusante, temperatura e conteúdo de ar no líquido. Não houve investigações da quantidade de ar dissolvida nos ensaios. As temperaturas dos ensaios foram mantidas entre 40-70°C, pois para os testes vibratórios, as maiores taxas de erosão se dariam dentro desse intervalo de temperaturas. Os resultados foram apresentados mostrando o efeito de cada um dos parâmetros envolvidos. O tempo de teste e a velocidade do jato (por conseguinte a pressão a montante) podem ser plotados um contra o outro, mostrando que todas as variáveis podem ser controladas independentemente. O equipamento alia as vantagens do fluxo induzido de cavitação, com um tempo de teste curto. Isso ocorre devido, principalmente, a magnitude de velocidade que é da ordem de 100m/s. No ensaio com o Venturi, por exemplo, as velocidades são da ordem de 40-50 m/s. O autor recomenda que a unidade tenha funcionamento simples, e que o número de variáveis deve ser minimizada. Sugere que os testes se dêem com uma distância fixa, independentemente se ela é ótima ou não para aquela condição de escoamento. Também, destaca a importância de se utilizar um número de cavitação constante para evitar problemas de escala.

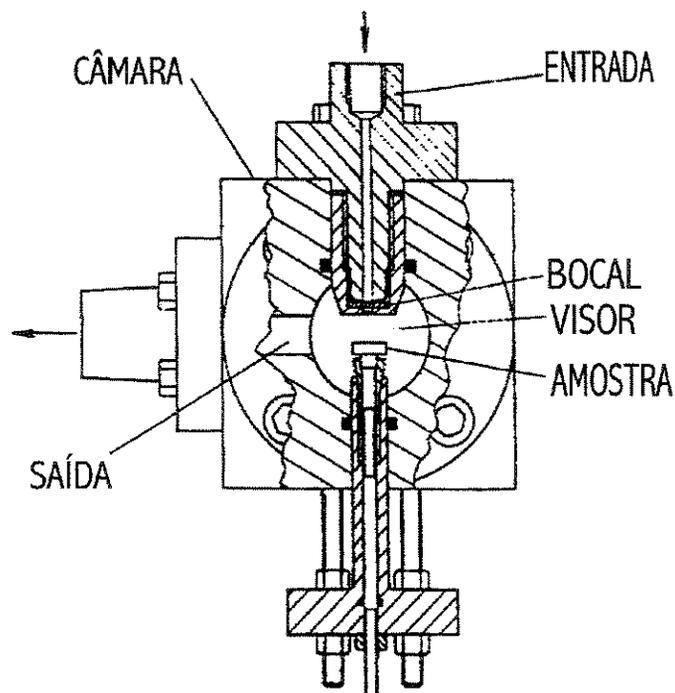


Figura 5.3. Detalhe do aparelho de LICHTAROWICZ (1979).

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

GIKAS (1981) pesquisou os efeitos da cavitação sobre superfícies de resina epóxi e concretos comuns e especiais. No estudo faz um breve relato sobre a tentativa de normalizar os ensaios sobre a cavitação. Porém, materiais de mesma matéria prima, com mesmas técnicas de moldagem e ensaios em máquinas idênticas, não apresentavam desgastes iguais. Não se mostrou viável então, a normalização dos dispositivos cavitantes, mas sim, a classificação relativa dos materiais, em face da resistência oferecida por eles à cavitação. Assim, mesmo quando os aparelhos não eram semelhantes, esse tipo de classificação coincidia. No caso deste ensaio, optou-se por utilizar o Venturi para verificar o efeito desgastante sobre os corpos de prova, como visto nas Figuras 5.4 e 5.5. Foram realizadas três adaptações na instalação de forma a reduzir o tempo de ensaio que, inicialmente era da ordem de 140 h. Então, da primeira bomba utilizada ( $H=20\text{m}$ ,  $Q=100\text{l/s}$ ), passou-se para ( $H=50\text{m}$ ,  $Q=150\text{l/s}$ ), reduzindo o tempo de ensaio para ordem de 60h. Para diminuir ainda mais o tempo de ensaio, o difusor Venturi foi modificado, passando o tempo de ensaio para a ordem de 30h. O autor ressalva que o critério de desgaste calculado como perda de peso por unidade de tempo só é aceitável se as amostras atingirem a fase de erosão estável. Também, a identificação do momento quando se inicia a cavitação é de difícil detecção. O parâmetro de medida seria relacionar propriedades do material correlacionadas a resistência à cavitação. Desta forma, o coeficiente de elasticidade na ruptura, a dureza, a tensão de ruptura, a tensão de escoamento e a energia de deformação nessa ordem seriam aceitáveis para a realização da correlação. Nos ensaios, o autor utilizou a tensão de ruptura como parâmetro de relacionamento.

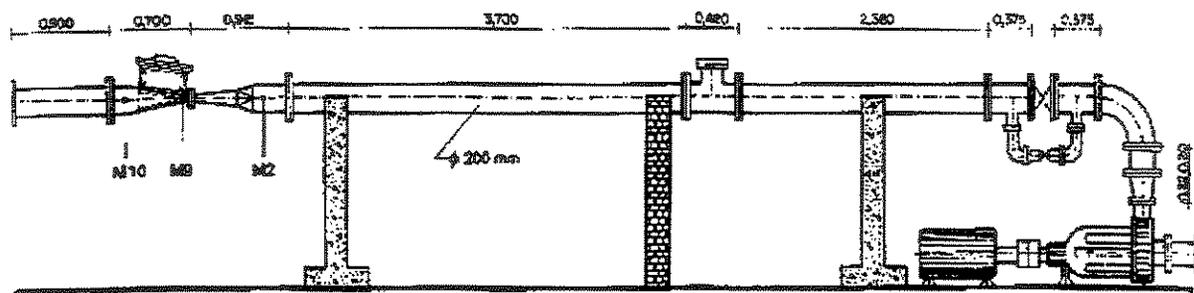


Figura 5.4. Instalação utilizada nos ensaios de cavitação de GIKAS (1981)-Montagem definitiva.

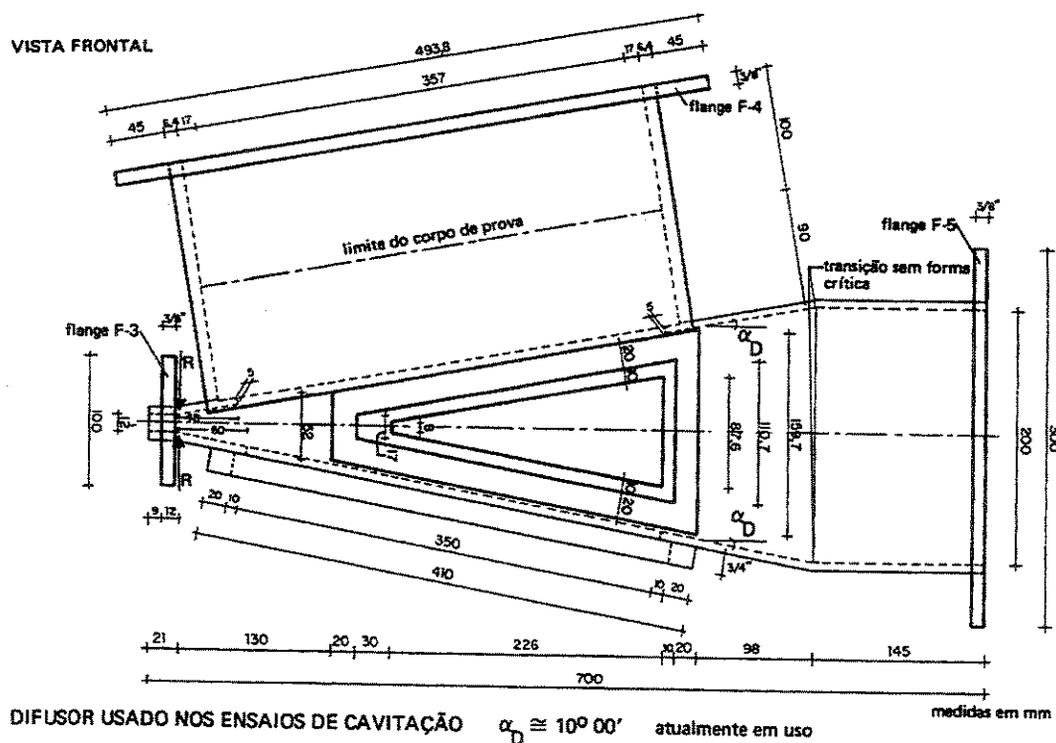


Figura 5.5. Detalhe do difusor utilizado na instalação de GIKAS (1981)-definitivo.

CONN et al (1984) estudaram aplicações do jato cavitante para limpeza submersa de plataformas de concreto e corte de cimento. Também, verificaram a viabilidade de separar barras de aço do concreto, de forma a poder se reutilizar estes dois materiais em vez de simplesmente inutilizá-los devido a falta de precisão de um método de corte prático. Os autores desenvolveram um orifício para a condição de fluxo estável, que denominaram CAVIJET (Figura 5.6). No CAVIJET uma peça central interrompe o fluxo próximo a linha central do jato, focando-o e fornecendo condição de limpeza e corte mais intensos. Em seguida, o Quadro 5.1 fornece as especificações dos orifícios utilizados.

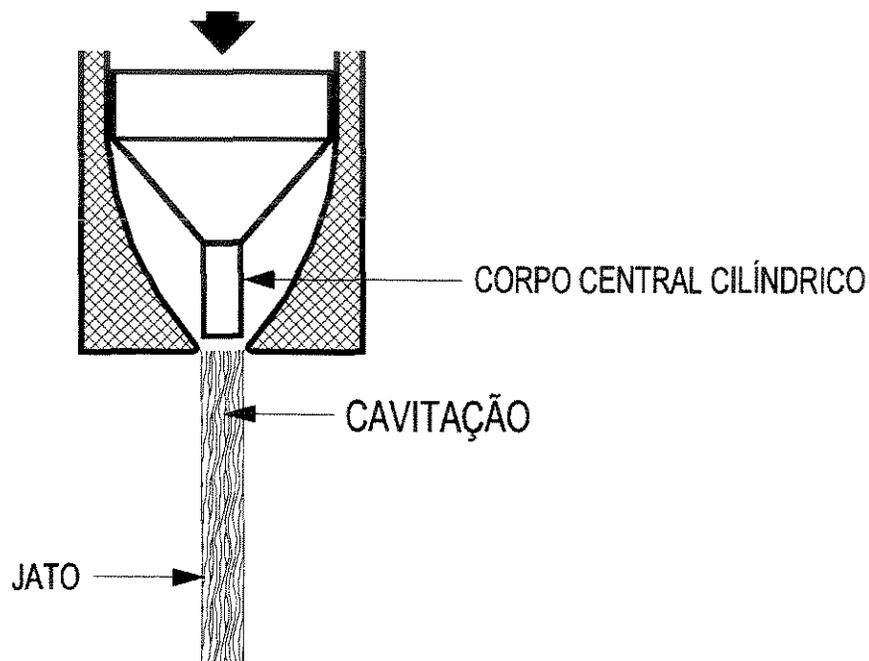


Figura 5.6. Detalhe do orifício CAVIJET, desenvolvido por CONN et al (1984).

AMBLARD, BONAZZI e LECOFFRE (1988), relatam desenvolvimentos sobre método de previsão de erosão devido à cavitação. O estudo se dividiu em duas partes, onde na primeira, apresentam-se leis de similaridade de um método quantitativo de previsão de erosão num escoamento cavitante. Em seguida, relatam resultados de testes quanto ao efeito do ar dissolvido nos casos em que houve erosão produzida por cavitação.

Quadro 5.1. Especificações dos bocais.

CASO	Diâmetro do orifício (mm)	Pressão da bomba (MPa)	Vazão (l/min)	Potência da bomba (kW)
Limpeza de plataformas	2,3	68,9	52,2	75
Corte de cimento	1,4	68,9	76	112
Corte de concreto armado	2,7	66,2	72	79

Fonte - CONN et al (1984).

AVELLAN e FARHAT (1988) comentam que a erosão por cavitação de máquinas hidráulicas é, principalmente, devido ao colapso de cavidades que são formadas no curso do “bordo de ataque” das cavidades. Estas cavidades conhecidas como “vortex cavitante”, tem como característica, filamentos movendo-se rapidamente e contorcendo-se, que são formados de acordo com a intensidade do campo de vorticidade gerado na zona terminal dessas cavidades. Os autores utilizaram um gerador de “vortex cavitante” que permite produzir repetida e controladamente o colapso deste tipo de cavidade. Através de uma câmara de alta velocidade (1 milhão de imagens por segundo), do controle da pressão e da fase de vapor registraram impactos violentos (10-20Kbars), que provocaram danos observados pelos autores.

BONAZZI e FOURNIER (1988), em seu estudo sobre cavitação utilizaram a válvula de ajuste Monovar, desenhada para responder as necessidades de pesquisa no campo da cavitação. A Monovar permite que se registre um coeficiente sonoro da cavitação inicial, assim como possui uma baixa sensibilidade a erosão por cavitação.

CHENG, WEBSTER e WONG (1990) estudaram o efeito da cavitação em amostras de concreto utilizando um aparelho tipo jato cavitante. Citam que a cavitação deve, de preferência, ser eliminada na fase de projeto. Porém, apesar de teoricamente possível, na prática este objetivo pode ser de custo muito alto ou impossível de se implementar. Isto leva ao estudo de materiais que aumentem a vida útil da estrutura. Comparam três métodos de ensaios. O teste vibratório ultra-sônico cria condições de cavitação expondo amostras submersas a oscilações de alta frequência. Salientam que este teste é de validade limitada uma vez que não leva em consideração os efeitos da alta velocidade do escoamento. Contudo, é o único método que possui uma padronização de ensaios. O segundo ensaio foi utilizando dispositivo Venturi, com altas velocidades e alta carga. Também, devido as amostras serem maiores que aquelas do primeiro dispositivo, foi possível obtê-las de maneira mais realista, com relação ao agregado usado e condições de mistura. Os testes foram conduzidos sob uma carga de 137m, e vazão de  $0,5\text{m}^3/\text{s}$ , numa tubulação de diâmetro de 0,3m, produzindo velocidade de 32m/s pela célula de teste. Cada teste durou 7 horas. Outro equipamento utilizado pelos pesquisadores foi do tipo jato cavitante, com um bocal desenhado para produzir cavitação, assim que o jato, deixa o orifício. Esse equipamento 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. Utilizando uma bomba tipo pistão a uma carga de 14,5MPa, com um motor de 5hp e vazão de  $3,9 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$ , determinaram a partir de uma série de ensaios que a distância de 51mm entre o orifício e a amostra é a ótima. O tempo de ensaio foi estabelecido, monitorando as pressões de forma a causarem dano visível num período de 1 minuto. Foram testadas amostras de concreto, recobertas com pintura de epóxi, de forma a verificar a adesividade entre os materiais, comparando amostras que sofreram tratamento de irradiação com raios  $\gamma$ , com outras sem o mesmo tratamento. Também, realizaram ensaios dessas amostras com ar. Como resultado, as amostras irradiadas de forma a garantir melhor adesão tiveram performance muito superior às sem tratamento prévio. As amostras dos ensaios submersos tiveram desgastes muito maiores que aqueles com ar. Comparando os resultados entre os diferentes ensaios, os corpos de prova submetidos ao teste com o Venturi e com o jato cavitante sofreram erosões bem maiores que os do ensaio com o equipamento ultra-sônico vibratório. Isso, na interpretação dos autores, é devido ao ensaio ultra-sônico simular o efeito puro de cavitação, sem levar em consideração os efeitos

do escoamento de alta velocidade. Assim, o ensaio referido não é aceitável para medir a eficiência de materiais resistentes à cavitação. Salientam que procedimentos de testes com o equipamento de jato cavitante devem ser desenvolvidos, uma vez que requer pouca vazão, tempo curto de ensaio, a um custo menor que o dispositivo Venturi, facilidades que requerem bomba de capacidade bem maior.

HUOVINEN (1992) estudou abrasão de estruturas por ação do gelo, utilizando uma máquina especial que simulava essa ação.

BILLARD e FRUMAN (1992), realizaram testes para determinar o efeito da modificação da turbulência a montante das condições de cavitação crítica num Venturi. Os resultados mostraram que a cavitação é impedida quando a intensidade de flutuação da turbulência aumenta. Uma análise associou este efeito com o comportamento adiabático do gás dentro da cavidade.

BOUDIA et al (1997) estudaram a cavitação em espaços confinados. Os autores citam que quando se estuda o problema da cavitação, estando o escoamento sob pressão ou não, os espaços onde ocorre são sempre de dimensões maiores em comparação com alguns casos especiais onde podem existir. Todavia, há um certo número de casos de hidrodinâmica interna onde o líquido está confinado entre paredes fixas ou móveis, limitando espaços de dimensões da ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$  m. São exemplos típicos de situações encontradas em lubrificação, controle de escoamento por restritores de seção. As pesquisas foram voltadas as áreas de aplicação industrial, como nas válvulas de controle de sistemas de condução de carros e no escoamento ocorrendo nas fronteiras de um contato entre um cilindro rotativo e uma parede curva. É apresentado o esquema de uma máquina de ensaio destinado aos fins propostos.

JEANNERAD e NICOLE (1998) pesquisaram a cavitação em sistemas de injeção a diesel, o processo de erosão e as maneiras de evitá-la. Porém, a falta de conhecimento dos mecanismos da cavitação e o tipo de cavitação atuante, envolveram um importante estágio experimental para conhecer o mecanismo de erosão. Depois deste estágio, em seu trabalho, os autores realizaram um cálculo bidimensional de um jato sujeito à cavitação, atentando ao

processo de formação das bolhas. O objetivo foi de prever áreas erodidas por escoamento permanente numa geometria definida. Foram citadas soluções para reduzir o efeito da cavitação. O estudo apresentou grandes dificuldades nas medições, tornando necessário cálculo preventivo quanto à cavitação.

DALFRÉ FILHO, GENOVEZ e PAULON (2000) determinaram o desgaste provocado pela mistura água-sólido nos concretos empregados em estruturas hidráulicas. Para isso, construíram uma máquina de ensaio especial, onde esferas metálicas eram agitadas por uma pá, simulando o efeito erosivo de material sólido na água. Para os corpos de prova de concreto, foram usados materiais e tecnologia nacionais, bem como adições de produtos de tecnologia inovadora, como a nanossilica, para obtenção de concreto auto-adensável. Definiu-se então, a composição das amostras que menos desgaste sofreram.

## 5.2 ESTRUTURAS HIDRÁULICAS, MATERIAIS E TÉCNICAS EMPREGADOS EM REPAROS

QUINTELA e RAMOS (1980) fazem uma análise do problema da erosão provocado pela cavitação em vertedores sujeitos a elevadas velocidades. Os autores citam como medidas de proteção a especificação do acabamento das superfícies de concreto, de forma a não existir irregularidades, a utilização de concretos especiais (com fibras, com polímeros, por exemplos), revestimento de blindagens, ou películas protetoras, além da aeração da veia líquida. Também, citam que em velocidades mais baixas pode ocorrer cavitação em ranhuras de comportas, pilares, blocos de amortecimento e de queda ou, em locais de redução de pressão motivada pelo traçado das obras (sifões, divergentes).

O “BUREAU OF RECLAMATION” (1981) estabelece as características e recomendações dos concretos de estruturas hidráulicas. No que se refere a erosão das superfícies

de concreto estabelece como causas a cavitação, o movimento de material abrasivo junto com a corrente líquida e o impacto do gelo. A cavitação causa as piores situações, seguida da erosão, onde até os melhores concretos ficam vulneráveis. Cita-se, por exemplo, o caso da bacia de dissipação de Yellowtail. Como recomendação, o citado manual propõe a prevenção, eliminação ou redução das causas através do projeto, construção e operação adequada das estruturas.

GRISHIN (1982) cita que as estruturas em concreto devem satisfazer as condições de estabilidade em todas as seções, de acordo com o estado de tensão. No contorno, há a ação de fatores externos como a variação de temperatura, infiltração e abrasão. Desta forma, o concreto nestas zonas deve possuir “requisitos adicionais”. A seleção racional dos compostos do concreto faz com que se obtenha um concreto durável e econômico.

No trabalho de MARCHANTE, ROSÁRIO e BRAGA (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).

FALVEY (1990), em um trabalho muito completo sobre cavitação em estruturas hidráulicas, enumera fatores que determinam se a estrutura irá ou não sofrer dano devido à cavitação. São estas as causas da cavitação: o local do dano, a intensidade da cavitação, a magnitude da velocidade de escoamento, o ar contido na água, a resistência da superfície ao dano e, finalmente, o tempo de exposição da superfície. Cita o caso da barragem de Glen Canyon, onde foram encontrados pedaços de concreto presos às extremidades da armação.

ABBASOGLU e OKAY (1992) estudaram o problema de erosão na bacia de dissipação da barragem de Keban. Para o controle da cavitação foram estudados aeradores, realizando sua construção e o posterior controle.

A abrasão das superfícies hidráulicas não é um problema novo e em regiões montanhosas tende a ser mais pronunciado segundo GREIN e SCHACHENMANN (1992). Com a tendência atual de se construir estruturas mais econômicas e a utilização de máquinas mais

velozes, torna-se necessário solucionar ou, pelo menos minimizar os efeitos de erosão. As formas características da erosão e as zonas onde ocorre, dependem das forças atuando nas partículas sólidas suspensas. Se estas partículas são mais duras que os componentes da superfície da estrutura, se estão em altas velocidades e são arrastadas pelas superfícies molhadas, isto causa ranhuras na superfície e remoção de material. Os autores ainda dividem as superfícies molhadas em duas categorias. Uma em que a velocidade de escoamento é baixa, canais hidráulicos geralmente em concreto, que são protegidos por camada relativamente elástica de material resistente a corrosão, com espessura de alguns milímetros. A segunda categoria é a de alta velocidade, como as que se verificam nas turbinas. Vale ressaltar que na pesquisa estudaram principalmente o dano causado em instalações hidrelétricas.

A existência de erosões significativas distribuídas uniforme e simetricamente ao longo de toda a largura do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Porto Colômbia foram descritas por CARVALHO, ALMEIDA e FARIA (1992). Os danos ocorridos tiveram sua origem num processo típico de erosão por vórtice. As crateras de erosão na laje da bacia de dissipação, que atingiam as dimensões médias de 2,0m de comprimento por 1,65m de largura e 0,70m de profundidade, possuíam sinais evidentes de arrancamento do concreto das ferragens.

MEHTA e MONTEIRO (1994), fazem diferenciação entre desgaste por abrasão, desgaste por erosão, além do desgaste por cavitação. O termo abrasão, segundo os autores, se refere geralmente ao atrito seco e erosão, ao desgaste pela mistura água-sólido. No trabalho ainda comentam que, enquanto concretos de boa qualidade mostram excelente resistência a fluxos constantes de alta velocidade de água pura, fluxos com perturbações e velocidades acima de 12m/s (7m/s em condutos fechados) podem causar erosão severa do concreto devido à cavitação. A cavitação causa erosões localizadas, tornando a superfície afetada irregular, ao contrário do desgaste por sólidos em suspensão que apresenta forma mais regular. Assim, um concreto resistente pode não ser eficaz na prevenção de danos devido à cavitação.

TATRO et al (1992) na ACI Committee Report 210.1R-94 relatam casos de reparos em estruturas hidráulicas de concreto, que sofreram erosão. O Quadro 5.2, lista o tipo de estrutura, o tipo de reparo, e a performance do reparo.

Quadro 5.2. Estruturas que sofreram danos por cavitação.

ESTRUTURA	TIPO	REPARO	DESEMPENHO
Dworkshak (EUA)	Barragem de gravidade	Impregnação de polímero	Bom, com alguns reparos periódicos.
Glen Canyon (EUA)	Barragem em arco	aeração	Bom.
Lower Monumental (EUA)	Eclusa	Epóxi	Insuficiente.
Lucky Peak (EUA)	Tomada de água	Redesenho e cobrimento com chapa de aço.	Surgimento novamente de cavitação e danos.
Terzaghi (EUA)	Tomada de água	Redesenho hidráulico	Bom.
Yellowtail (EUA)	Bacia de dissipação	Vários recobrimentos e aeração	Bom.
Keenleyside (EUA)	Tomada de água	Concreto de alto desempenho	Recorrência da cavitação e danos

Fonte - TATRO et al (1992).

Foram relatados casos de erosão por cavitação, abrasão e ataque químico. Citam-se os casos de cavitação nas barragens de Dworshak, Glen Canyon, Lower Monumental, Lucky Peak, Terzaghi, Yellowtail e Keenleyside. As soluções utilizadas foram desde a substituição do concreto das áreas danificadas até a construção de aeradores.

LAMOND (1997), cita que para a resistência à abrasão de concretos, a ACI 201.2R recomenda valores de compressão acima de 28MPa. Ressalva que para locais onde a abrasão seja muito grande, devem ser empregados agregados resistentes à abrasão. Comenta também, quais as recomendações para o caso em que se utilize metais revestidos com concreto e para situações onde os agregados sejam potencialmente reativos, de forma a se obter estruturas duráveis. Termina listando fatores que resultam em um concreto com baixa durabilidade.

Em um trabalho sobre a durabilidade das construções NEVILLE (1997) destaca a necessidade de selecionar misturas apropriadas de concreto, requerendo conhecimento atualizado dos materiais. Porém, é necessário também que todas as operações de concretagem sejam bem executadas. Além disso, a estrutura tem de estar muito bem projetada não só do ponto de vista da resistência, mas com respeito a exposição a condições locais e ao microclima.

BOUVARD (1997) apresentou trabalho sobre a cavitação em vertedores de grandes barragens, onde a ação da cavitação na maioria das vezes torna-se presente, não sendo a análise do problema simples. Cita-se o caso da barragem de Karun (Irã), onde é explicitada a coincidência da região afetada pela erosão por cavitação com uma junta transversal, no perfil do vertedor. Como exemplo de solução, cita os aeradores desenvolvidos por Pinto (1979), para a barragem de Foz de Areia.

NEALE e LABOSSIERE (1998), relatam caso de reparos em pilares submersos em pontes no Canadá, enfatizando a resistência ao desgaste devido às correntes carregando material sólido, ao impacto de blocos de gelo e ao próprio resfriamento.

### 5.3 CONCLUSÃO

Como conclusão, pode ser notado que se encontra extensa bibliografia sobre o problema da erosão por sólidos e também por cavitação na área mecânica, com estudos sistemáticos em materiais metálicos especialmente. 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.

## 6 METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentadas as características do banco de ensaio e metodologia dos ensaios.

### 6.1 BANCO DE ENSAIO

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 Foto 6.1 está representado o equipamento de ensaio construído. A água é conduzida do reservatório até a instalação de ensaio por meio de uma bomba. De modo a permitir a visualização dos ensaios, as amostras serão ensaiadas dentro de um recipiente de acrílico. Este recipiente possui dois drenos, um superior de diâmetro de  $7,62 \times 10^{-2} \text{m}$ , para efetuar a restituição do líquido que passou pela instalação ao reservatório de alimentação. O outro localizado na parte inferior do recipiente, com válvula de PVC de diâmetro  $1,27 \times 10^{-2} \text{m}$ , serve para eventual esvaziamento do recipiente e para limpeza. Também, foi previsto dreno através de válvula de  $2,54 \times 10^{-2} \text{m}$ , para eventual esvaziamento do reservatório de alimentação.

Na tubulação de sucção do equipamento foram instalados uma válvula de pé e crivo (Foto 6.2) e um filtro, enquanto que na saída da bomba está instalado um tanque para

regularização do escoamento. Um manômetro utilizando glicerina como fluido e escala de 0 a 7MPa é empregado para medição da pressão (observar Fotos 6.4 e 6.5). No projeto original previa-se utilizar tubos rígidos, mas optou-se por usar tubos flexíveis de forma a evitar cotovelos, emendas e propiciar 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  $2,54 \times 10^{-2} \text{m}$ , é especial e suporta pressões de até 13,8MPa.

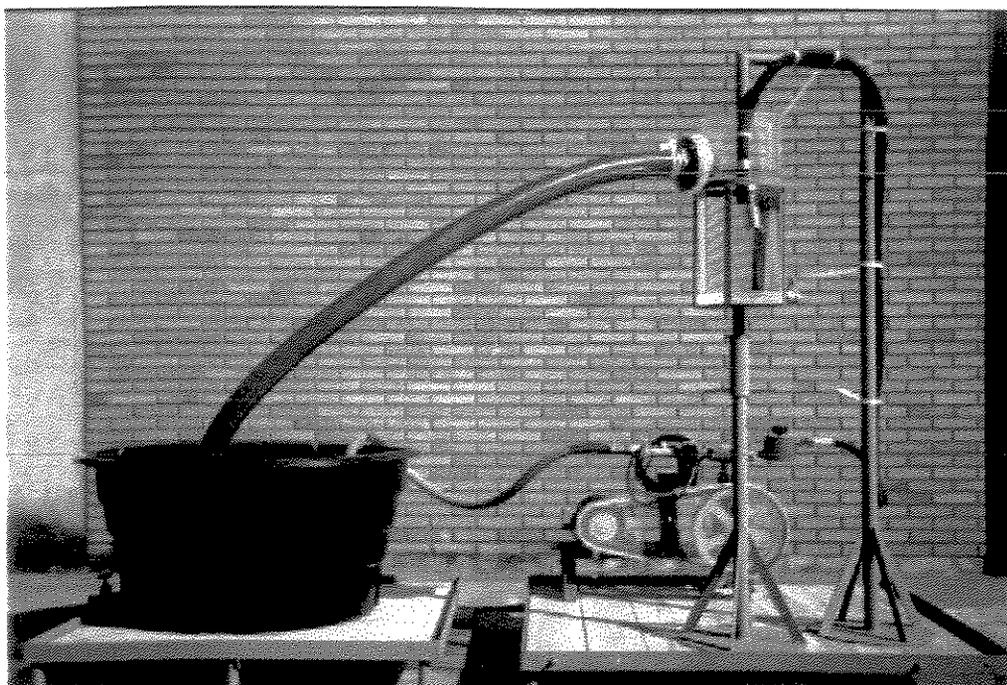


Foto 6.1. Banco de ensaio utilizado neste trabalho.

Um bocal de aço inox, cônico, de ângulo de abertura de  $20^\circ$ , que permite a substituição de diferentes tipos de diâmetros de orifícios, variando de 1 a 7mm, através de uma rosca e quatro parafusos “Yale” (para garantir a segurança) é utilizado para simular o efeito combinado do escoamento em alta velocidade e da cavitação normalmente presente nas estruturas hidráulicas.



Foto 6.2. Válvula de pé e crivo, na tubulação de sucção da instalação.

O recipiente acrílico e o tubo flexível de alta pressão são apoiados em suportes metálicos especialmente construídos. O suporte do recipiente constitui-se de dois tubos metálicos concêntricos, de  $3,18 \times 10^{-2} \text{m}$  e de  $2,54 \times 10^{-2} \text{m}$ , onde 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. Uma grade, também metálica, envolve o recipiente fixado ao seu apoio. Dessa maneira é possível ajustar a distância do bocal à amostra, sem dificuldades. O suporte da mangueira utiliza o mesmo sistema, porém sem a rosca e camisa, permitindo giro de  $360^\circ$ , do tubo interior (Foto 6.3).

Todo o banco de ensaio está montado sobre uma plataforma de estrutura metálica, com tablado de madeira. Esta bancada permite agilidade nos ajustes para os ensaios. Nas Fotos 6.4 e 6.5 se mostra a instalação com a bomba de deslocamento direto e com a bomba centrífuga, respectivamente.

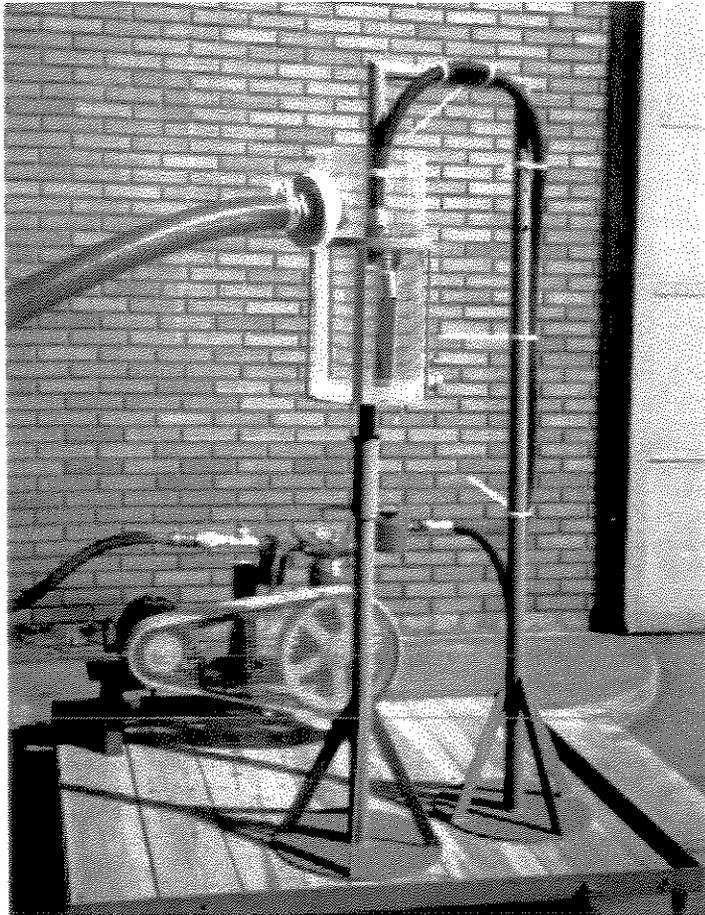


Foto 6.3. Suportes metálicos para o recipiente de acrílico e tubo flexível de alta pressão.

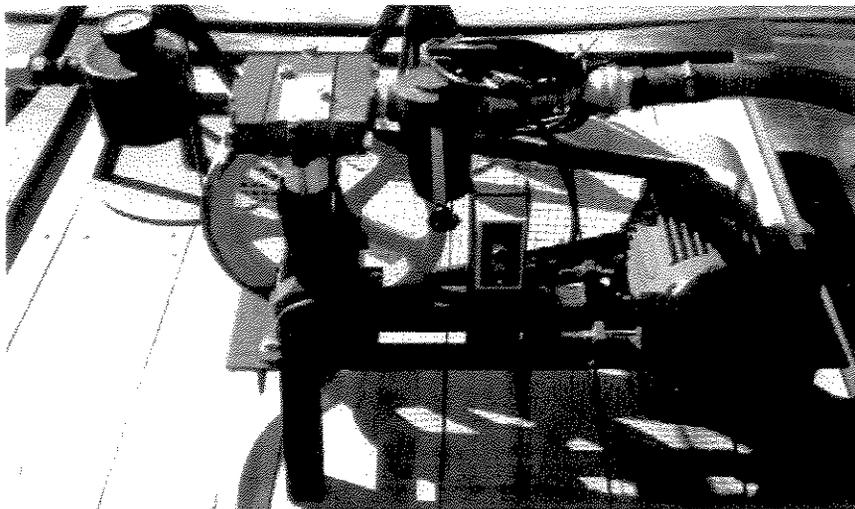


Foto 6.4. Bomba de deslocamento positivo de três pistões, filtro na sucção, tanque regularizador e manômetro

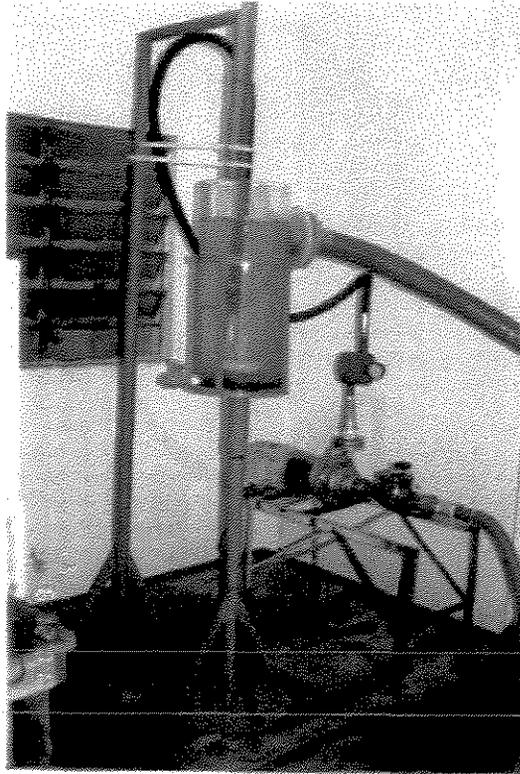


Foto 6.5. Bancada de ensaio utilizando a bomba centrífuga.

## 6.2 METODOLOGIA DE ENSAIO

A água é conduzida do reservatório ao recipiente de acrílico que contém as amostras, através da mangueira de borracha de baixa expansão volumétrica. No extremo final desta tubulação encontra-se o orifício. A jusante desse orifício ocorre o jato cavitante que incide sobre a amostra, desgastando-a. O recipiente é preenchido com água para simular a implosão das bolhas devido à cavitação. A água que entra no recipiente é conduzida novamente ao reservatório pelo dreno de  $7,62 \times 10^{-2} \text{m}$ .

A pressão será controlada através do manômetro. O índice de cavitação  $\sigma$  (sigma), definido no capítulo 4, para o qual aconteceram danos nos concretos de estruturas hidráulicas é da ordem de 0,15 segundo FALVEY (1990). A partir daí, é possível estabelecer um intervalo de diâmetros possíveis para os ensaios (1 a 7mm). A distância entre o jato e a amostra e o diâmetro do orifício são duas variáveis nos ensaios que deverão ser definidas através dos testes. Estima-se ensaios de curta duração, da ordem de minutos para verificar o efeito cavitante na amostra.

GIKAS (1980) relata que a perda de peso por unidade de área seria por si só válido, somente se as amostras atingirem a fase de erosão estável. Para definir a melhor amostra de concreto, uma vez obtida as variáveis de ensaio será então, calculado o número de 'pits' por área, conclusão através do estudo da literatura, que seria 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. Foram confeccionados corpos de prova adicionais para ensaios à compressão simples de acordo com a Norma Brasileira NBR 5738.

De maneira a auxiliar na obtenção dos resultados, foram utilizadas balança de precisão 0,01Kg para medição da perda de peso nos tempos de ensaios e lupa binocular de aumento 40x, para a contagem dos pits. Também, os tempos de ensaios foram cronometrados e as temperaturas, ambiente e da água, medidas.

## 6.3 ENSAIOS

### 6.3.1 ENSAIOS COM A INSTALAÇÃO DE BOMBA DE DESLOCAMENTO DIRETO

De acordo com o apresentado no item 6.2, iniciou-se a primeira fase dos ensaios com a instalação da bomba de deslocamento direto (Fotos 6.1 e 6.3).

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 afixada a mangueira através de abraçadeiras de alta pressão. Na primeira tentativa de ensaio da 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 a bomba. Procedeu-se então, a substituição das válvulas e foi possível recuperar o manômetro.

Em seguida, se instalou bocal de 2,50mm, obtido do alargamento do bocal de 1,00mm. Novamente, a pressão ultrapassou 7MPa, rompendo o manômetro, válvulas e a peça da saída da bomba em ferro fundido. Foram realizados as substituições e reparos necessários para a

continuação dos testes. 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. Procedeu-se ao alargamento dos diâmetros dos orifícios de 2,00 e 2,50mm para 3,25 e 3,50mm. Para garantir a segurança, foi instalado um pressostato para água, escala de 0-6MPa (neste caso calibrado para 4MPa), rosca de  $1,27 \times 10^{-2}$ m (BSP), de maneira a evitar que algum entupimento do bocal fizesse a pressão atingir níveis maiores que aqueles suportados.

Apesar de não fornecida pelo fabricante a curva característica, as bombas de pistão possuem comportamento da curva característica com inclinação muito acentuada. Ou seja, uma pequena diminuição na vazão, corresponde a 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 pretende para este estudo. Conseqüentemente, os ensaios com esta instalação foram feitos usando os bocais com orifícios de 3,00, 3,25 e 3,50mm de diâmetro.

Para testar o equipamento foram utilizadas amostras de aço carbono de superfície polida e 0,20m de diâmetro. Para a saída foram empregados os bocais de 3,00, 3,25 e 3,50mm, variando a distância entre as amostras e a saída do bocal de 0,05m a 0,15m. A cada dez minutos 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 o tempo de uma hora não houve qualquer sinal de desgaste na superfície dos corpos de prova testados. Nestes ensaios, a esta distância, a amplitude do jato cobriu as 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 até o tempo de uma hora 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. Desta forma, optou-se por trabalhar com uma distância de 0,05m e o bocal com orifício de 3,00mm até o final dos testes.

O som proveniente deste ensaio era similar ao de crepitações, descrito na literatura como característico da cavitação. Permanecer ao lado do equipamento por um tempo prolongado, sem proteção auricular era impossível, pois se ouvia os ruídos a muitos metros de distância da sala onde se encontra a instalação. Através do recipiente acrílico 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, nas condições seguintes:

Pressão na saída da bomba: 3,50 MPa;

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

Temperatura ambiente: 22 a 26°C;

Distância da amostra ao bocal: 0,05m;

Diâmetro do bocal: 3,00mm.

Inicialmente, foi programado o uso de corpos de prova com 0,20m de diâmetro e 0,05m de altura para os ensaios à cavitação. Contudo, o seu uso ficou inviabilizado pela necessidade da visualização da amostra ensaiada através da lupa binocular. Para a distância de 0,05m entre o bocal e a amostra, a área de incidência do jato sobre a amostra era cerca de 0,07m, 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. Os corpos de prova de concreto ensaiados foram denominados, de

acordo com o Quadro 6.1, onde constam os traços, agregados graúdos utilizados e as resistências das amostras à compressão axial.

Os corpos de prova foram moldados e desformados no dia seguinte. Permaneceram então, em um tanque de cura, até a data de realização dos ensaios, aos 7 e 28 dias. Os corpos de prova cilíndricos para ensaios à compressão axial foram realizados na condição de saturado seco. Os ensaios de concreto seguem as recomendações da Norma Brasileira 5738.

Quadro 6.1. Amostras de concreto utilizadas nos ensaios.

AMOSTRA	TRAÇO EM 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

Na amostra 2, realizou-se um furo com broca de vídia (diâmetro de 3,17mm, profundidade 8,00mm) comparando 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 maior que 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 alargá-lo para quatro vezes a sua profundidade.

Assim, a escolha do furo induzido foi de um diâmetro estreito e profundo com relação ao seu diâmetro, já que o intuito é desenvolver o dano devido à cavitação nos ensaios.

### 6.3.2 ENSAIOS COM A INSTALAÇÃO DE BOMBA CENTRÍFUGA

A fim de verificar o efeito nos testes do uso de equipamento que fornecesse baixas pressões, vazões maiores que aquela 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 de diâmetro e também nenhum orifício, o que apresentaria 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.

Foram realizados ensaios adicionais para verificar o efeito nas amostras do jato incidindo diretamente sobre elas, ou seja, verificando a ação de um jato livre sobre a amostra, sem o efeito de amortecimento da coluna de água dentro do recipiente. Neste caso, o efeito que causa o desgaste é a quantidade de movimento e não o efeito de um jato cavitante. Foi realizada a drenagem do recipiente pela parte inferior do mesmo, de tal forma que a água não se acumulava no seu interior. Manteve-se a distância de 0,05m entre o bocal e a amostra. Utilizaram-se os bocais de 9mm e também, 3mm para verificar o efeito de um diâmetro menor com esta bomba, nesta situação.

## 7 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios e a análise dos mesmos.

### 7.1 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos testes com as amostras de concreto e considerando o emprego das duas instalações, ou seja, com bomba de deslocamento direto e com bomba centrífuga.

#### 7.1.1 RESULTADOS COM A INSTALAÇÃO DE BOMBA DE DESLOCAMENTO DIRETO

De acordo com o procedimento descrito no item 6.2 e nas condições de ensaio definidas no item 6.3.1, foram testadas diferentes amostras de concreto. A seguir, apresenta-se a descrição

dos resultados obtidos com cada uma das amostras ensaiadas e o seu comportamento em função do tempo de ensaio.

⇒ *Amostra 1 (resistência: 43,00MPa; agregado: granito)*

*Tempo de ensaio: 10 minutos*

A área abrangida na amostra pelo jato é de aproximadamente 5 a 6cm . A abrasão é superficial, não atingiu grãos do agregado miúdo, existindo somente dano à nata superficial que recobre a amostra. Assim, é possível com certa precisão identificar os pits na superfície da mesma, através da lente binocular. Obtiveram-se, na média, 22 pits/cm<sup>2</sup>.

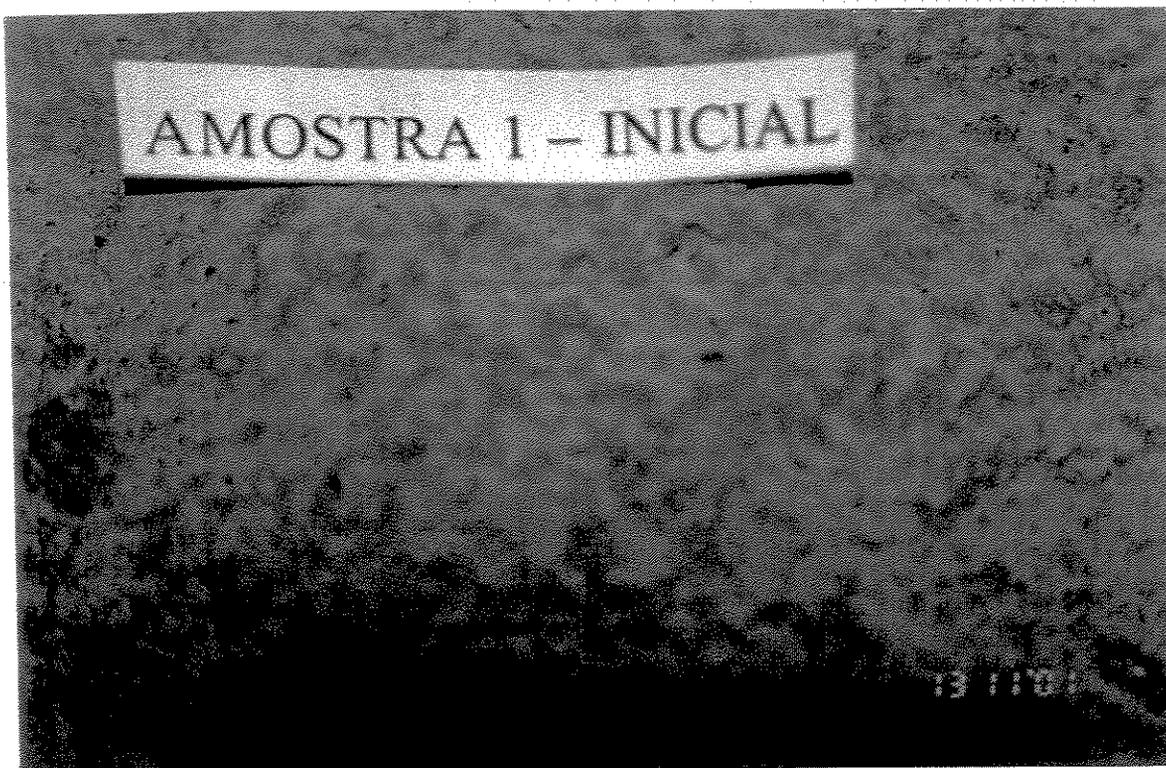


Foto 7.1. Amostra 1, antes dos ensaios.

*Tempo de ensaio: 30 minutos*

A tendência ao arrancamento das partículas de grãos do agregado miúdo que não são facilmente identificadas sem a lupa é pronunciada. O arrancamento destas partículas dificulta a contagem dos pits. Estimam-se 75 pits/cm<sup>2</sup> (Foto 7.2).

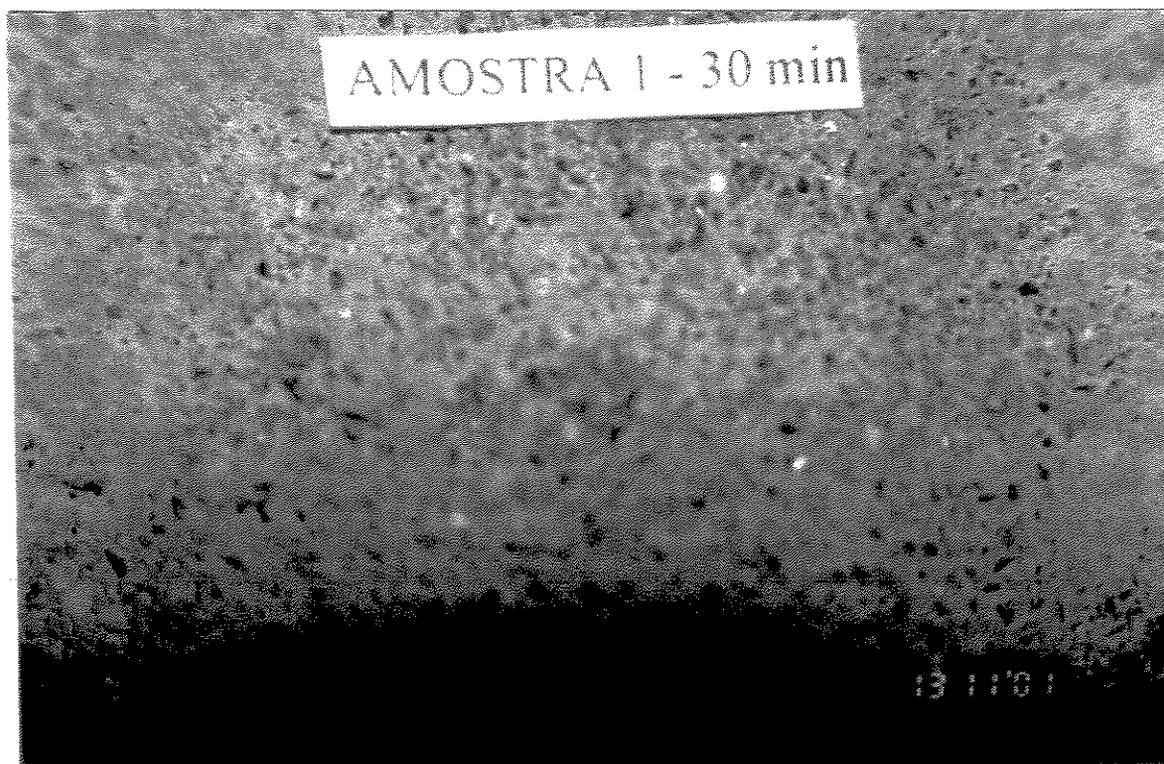


Foto 7.2. Amostra 1, tempo de ensaio 30 minutos.

*Tempo de ensaio: 50 minutos*

O número de partículas retiradas da amostra aumentou. Pela amostragem, obteve-se 88 pits/cm<sup>2</sup>, medidos sem o recurso da lupa binocular, pois através dela verifica-se seqüência de “mini fossas”, dificultando a contagem.

⇒ Amostra 2 (resistência: 6,23 MPa; agregado: calcário; furo induzido)

Tempo de ensaio: 10 minutos

Verificam-se erosões de até 7mm de profundidade e 3mm de largura ao redor do furo, quase tomando toda a extensão do visor da lupa. Próxima a região do furo, constata-se erosões máximas de 3mm de diâmetro e 4mm de profundidade. É nítida a tendência de arrancamento de grãos de quartzo do agregado miúdo, sendo que o dano não se distribui uniformemente na região, porém se concentra em torno dos grãos. Estima-se o dano em 85 pits/cm<sup>2</sup>.

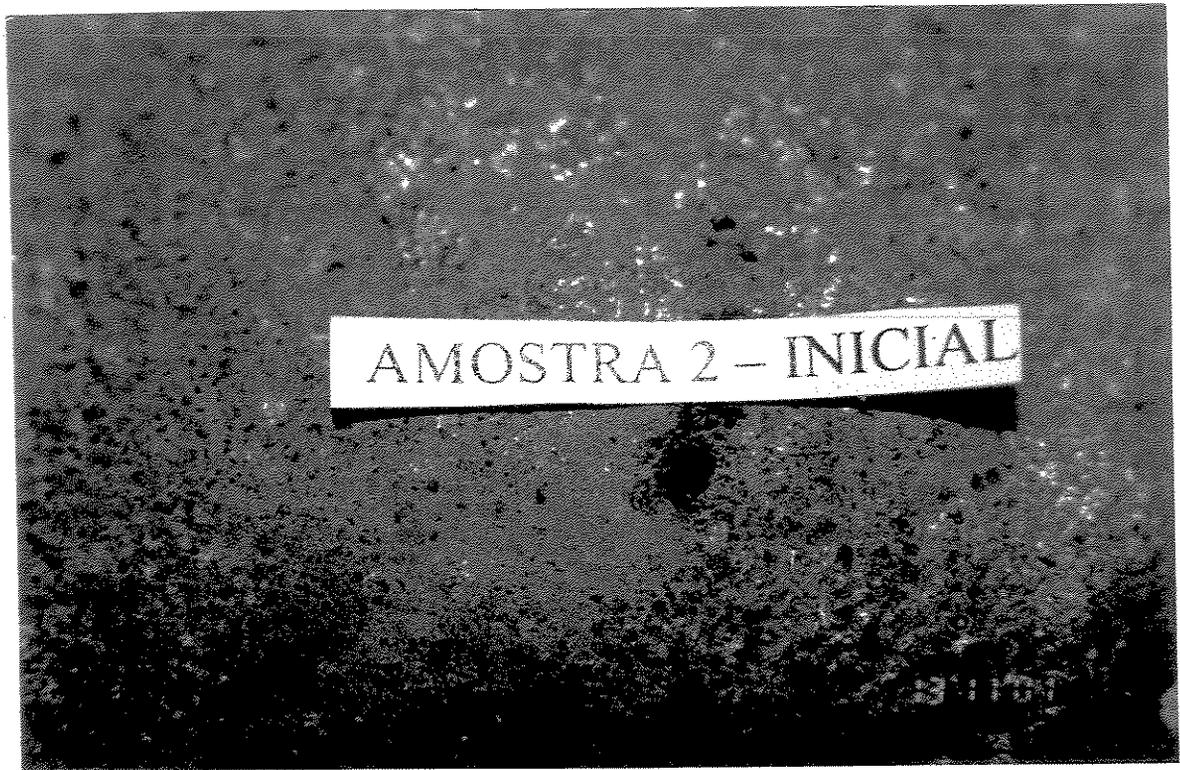


Foto 7.3. Amostra 2, antes dos ensaios

*Tempo de ensaio: 30 minutos*

O dano em torno do furo é bastante pronunciado e visível sem a lupa. Constatou-se início de tendência de arrancamento do agregado graúdo. Erosão máxima constatada de 15 mm de diâmetro e 10 mm de profundidade. Percebe-se a concentração do dano próximo ao furo. (Foto 7.4).



Foto 7.4. Amostra 2, tempo de ensaio 30 minutos.

⇒ Amostra 3 (resistência: 6,23MPa; agregado: calcário)

*Tempo de ensaio: 10 minutos*

A média da contagem de “pits” na região afetada resultou em 40 pits/cm<sup>2</sup>. Verifica-se erosão máxima de 3mm de diâmetro (constatado através da lupa) e 3mm de profundidade

(paquímetro). De maneira geral, a tendência do dano é concentrar-se em torno dos agregados miúdos.



Foto 7.5. Amostra 3, antes dos ensaios.

*Tempo de ensaio: 30 minutos*

Verificam-se regiões de destacamento do agregado miúdo. É difícil a contagem de pits. Profundidades entre 5 e 7mm (Foto 7.6).



Foto 7.6. Amostra 3, tempo de ensaio 30 minutos.

⇒ *Amostra 4 (resistência: 10,45 MPa; agregado: calcário)*

*Tempo de ensaio: 10 minutos*

O dano nesta amostra atingiu uma área onde se concentram agregados graúdos, pois a camada superficial foi arrancada deixando expostas as pontas dos agregados. Profundidades máximas da ordem de 1mm. Estimado 115 pits/cm<sup>2</sup>.

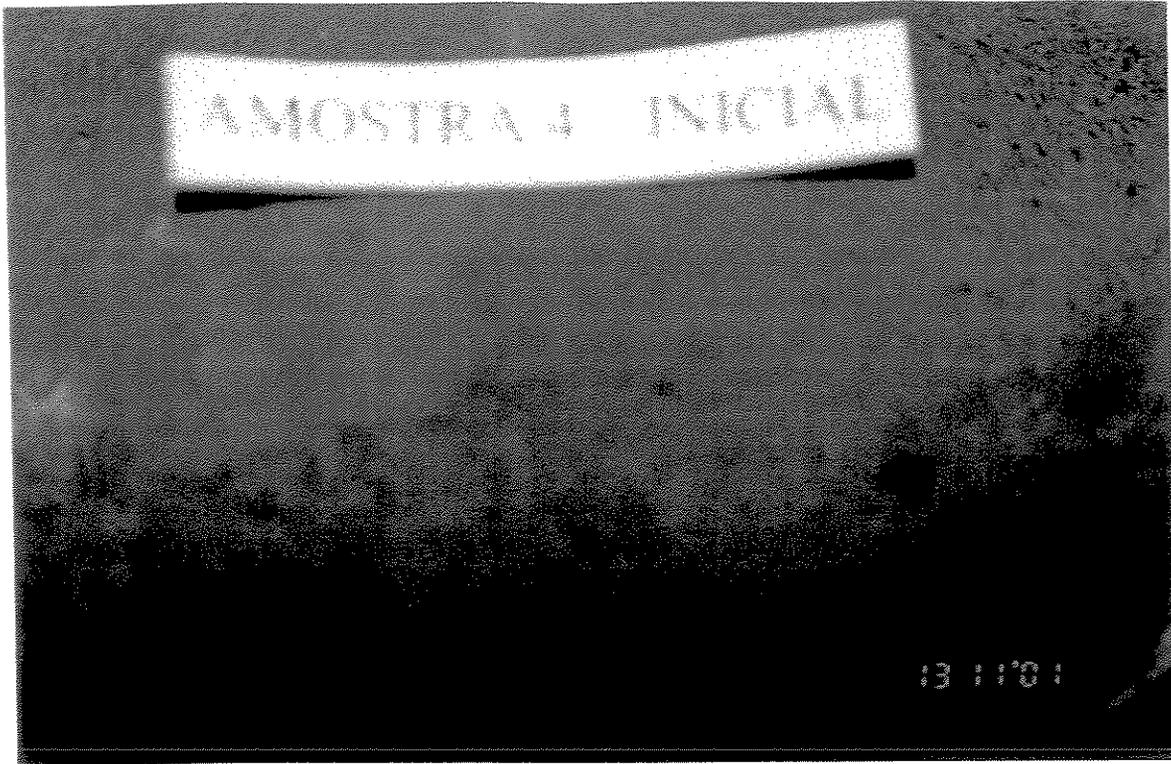


Foto 7.7. Amostra 4, antes dos ensaios

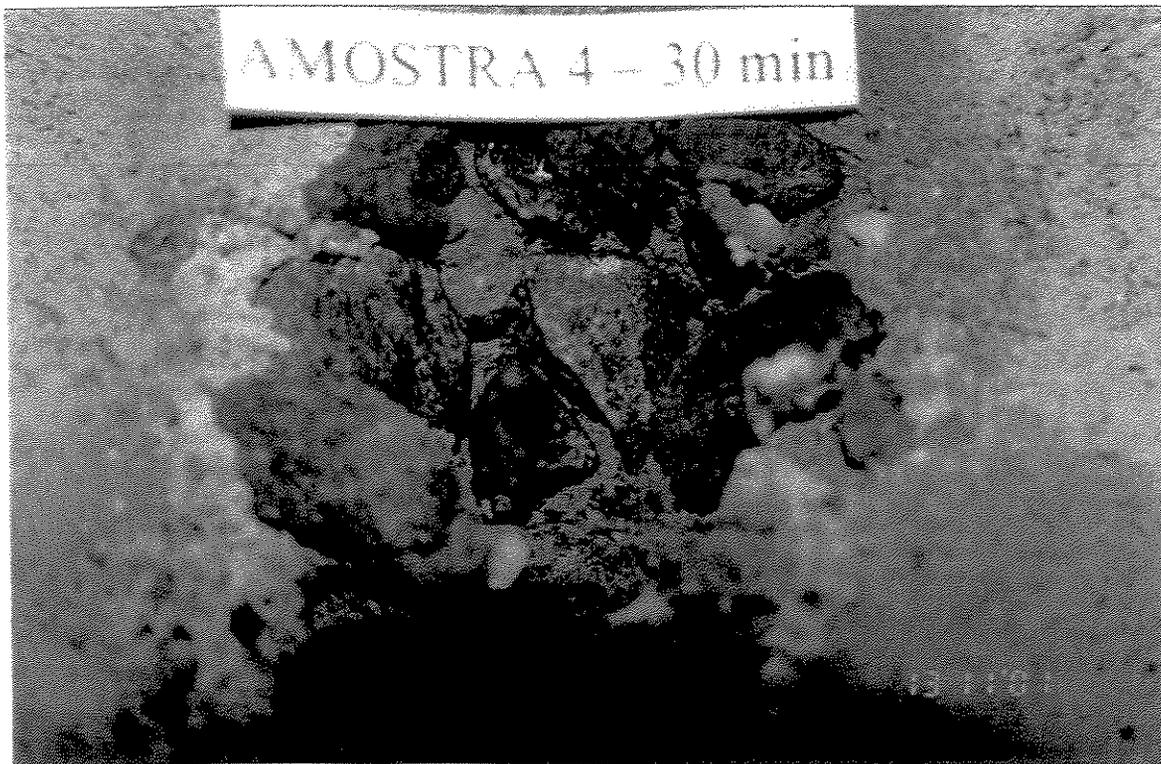


Foto 7.8. Amostra 4, tempo de ensaio 30 minutos.

*Tempo de ensaio: 30 minutos*

A área atingida na amostra foi de aproximadamente 4cm e manteve-se inalterada, durante o tempo de ensaio. O dano é visível a olho nu, e continua crescendo em torno dos agregados graúdos, aprofundando-se na amostra. É detectada erosão máxima de 8mm de profundidade (Foto 7.8)

O Quadro 7.1 apresenta um resumo da contagem de pits nos tempos de ensaios, quando era possível detectá-los ou quando se constatava fossa de erosão. Na Figura 7.1 é apresentado o gráfico de desgaste pelo tempo, das amostras ensaiadas.

Quadro 7.1. 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, onde 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.

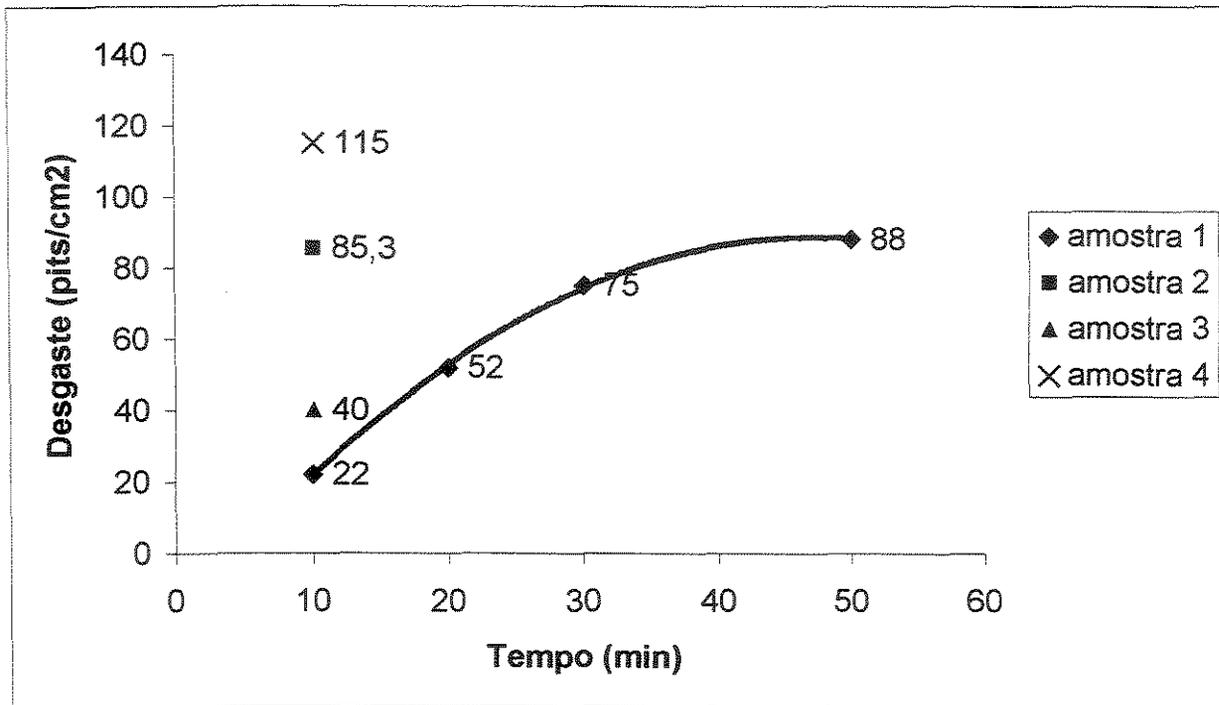


Figura 7.1. Erosão nas amostras ensaiadas pelo equipamento tipo jato cavitante.

### 7.1.2 RESULTADOS COM A INSTALAÇÃO DE BOMBA CENTRÍFUGA

Após 16 horas de ensaios (divididos em 2 dias) seguindo os procedimentos descritos no item 6.2, sem o uso de bocal, ou seja, com orifício de 9,00mm de diâmetro e distância de 0,05m do orifício até a amostra, analisando a amostra 2 na lupa de aumento de uma em uma hora, 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 acrílico. Também, não era possível escutar qualquer ruído que indicasse a existência de cavitação, como ocorreu com a bomba de deslocamento direto.

Nos ensaios sem o efeito amortecedor da coluna de água sobre a amostra (jato livre) não foi verificado nenhum desgaste, nem com o diâmetro de 9mm nem com o diâmetro de 3mm, ambos realizados com 5 horas de ensaios, analisando as amostras de uma em uma hora.

Assim, não foram testadas outras amostras, já que a amostra 2 possui a menor resistência dentre elas.

## 7.2 ANÁLISE

Neste item serão discutidos aspectos do equipamento de ensaio construído e em seguida, aspectos dos ensaios propriamente ditos.

### 7.2.1 AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE CAVITAÇÃO NA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

De acordo com o descrito no item 4.2.1, no caso de jato de água saindo de um orifício submerso (Figura 4.5), a Equação 4.16 é a mais adequada para o cálculo do índice de cavitação nos ensaios deste trabalho. Para as condições de ensaio apresentadas no capítulo 6, item 6.3.1, tem-se que:

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

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

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

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

Substituindo-se os valores dados na Equação 4.16, obtém-se  $\sigma_j = 0,86$ . Na Figura 7.2, FALVEY (1990) apresenta a caracterização da cavitação em função do valor do índice de cavitação. Assim, para  $(\sigma)$  maior que 3,00 não haverá cavitação, 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 de  $\sigma_j = 0,86$  corresponde ao de cavitação desenvolvida, portanto, adequado aos ensaios de cavitação em concretos.

No entanto, pode ser destacado que o emprego de bomba de maior pressão (não foi encontrada disponível no mercado interno) propiciaria o emprego de bocais de diferentes diâmetros o que permitiria reduzir o valor de  $(\sigma)$  para obter supercavitação. Consultando a literatura, como, por exemplo, BALL (1976), QUINTELA e RAMOS (1980), GRAHAM et al (1987) e FALVEY (1990), valores característicos do índice que provocaram desgaste em estruturas hidráulicas eram em alguns casos menores que 0,30. Mas o dano dependia não somente do valor do índice, mas também do tempo de exposição da estrutura a fluxos cavitantes, do acabamento da superfície e da geometria, entre outros.

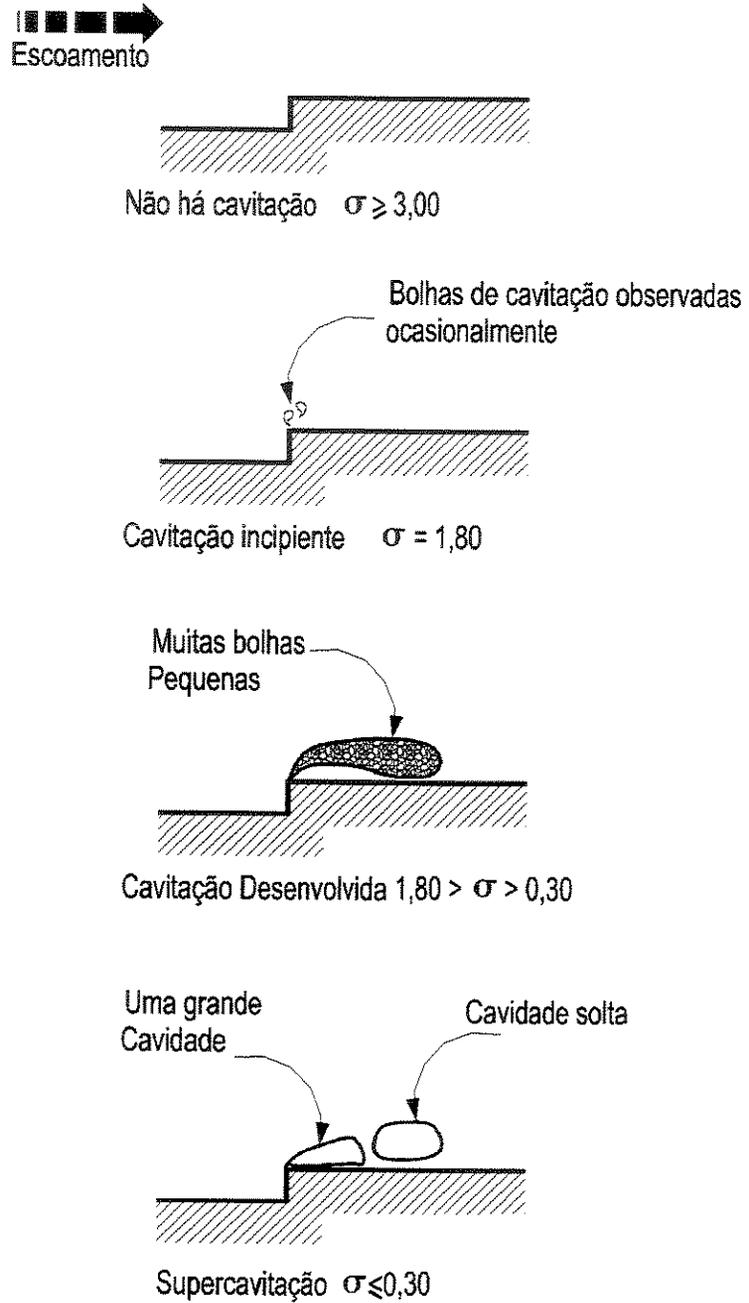


Figura 7.2. Desenvolvimento da cavitação.

Fonte - FALVEY (1990).

## 7.2.2 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO EQUIPAMENTO

Os níveis de pressão gerados numa superfície alvo espera-se que seja o fator preponderante na determinação da eficiência na operação de desgaste da superfície. Com escoamento permanente da água de um jato que incide na direção normal a uma superfície ( $P_s$ ), os níveis de pressão gerados são dados por:

$$P_s = \frac{1}{2} \rho v e^2, \text{ sendo:} \quad (7.1)$$

$\rho$  : massa específica;

$v e$  : velocidade do jato.

Níveis moderados de pressão não seriam normalmente adequados para operações de limpeza de superfícies, por exemplo. Em distancias maiores ao alvo, onde o jato tende a formar gotículas distintas, 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” ( $P_a$ ):

$$P_a = \rho c v e, \text{ sendo:} \quad (7.2)$$

$c$  : celeridade.

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

A pressão máxima ( $Pb$ ) desenvolvida quando colapsa uma bolha em um meio fluido incompressível, é dado por Rayleigh (1917), citado por HOULSTON e VICKERS (1978):

$$Pb = \frac{Ps}{6,35} \left[ \frac{Ri}{Rf} \right]^3, \text{sendo:} \quad (7.3)$$

$Ri, Rf$ : raios da bolha ao início e fim do colapso, respectivamente.

Para colapso isotérmico, Johnson et al (1972) citados por HOULSTON e VICKERS (1978), apresentaram a Equação (7.3) como:

$$Pb = \frac{Ps}{6,35} e^{(\gamma/\alpha)}, \text{sendo:} \quad (7.4)$$

$\alpha$ : relação entre a pressão de gás dentro da bolha no início de colapso e a pressão  $Ps$ .

Os resultados de ( $Pb$ ), para dois valores típicos de ( $\alpha$ ), são dados na Figura 7.3. Os resultados indicam que a pressão de colapso de cavitação, ( $Pb$ ), é menor que a pressão de impacto das gotículas, ( $Pa$ ), para valores de jatos de água de 50 até 400m/s. O limite máximo de ( $Pb$ ) é restringido pelo efeito inerente da compressibilidade até a pressão do “golpe de aríete”. O ponto onde ( $Pb$ ) se iguala a ( $Pa$ ) é função de ( $\alpha$ ) (Figura 7.3). O valor de  $\alpha = 1$  indica o menor dano devido à cavitação. Para valores acima de  $\alpha = 1$ , o dano por cavitação é inexistente.

Uma indicação da eficiência do desgaste por cavitação ( $R^*$ ), é obtida tomando-se a razão de ( $Pb$ ) para ( $Pa$ ):

$$R^* = \frac{Pb}{Pa} \quad (7.5)$$

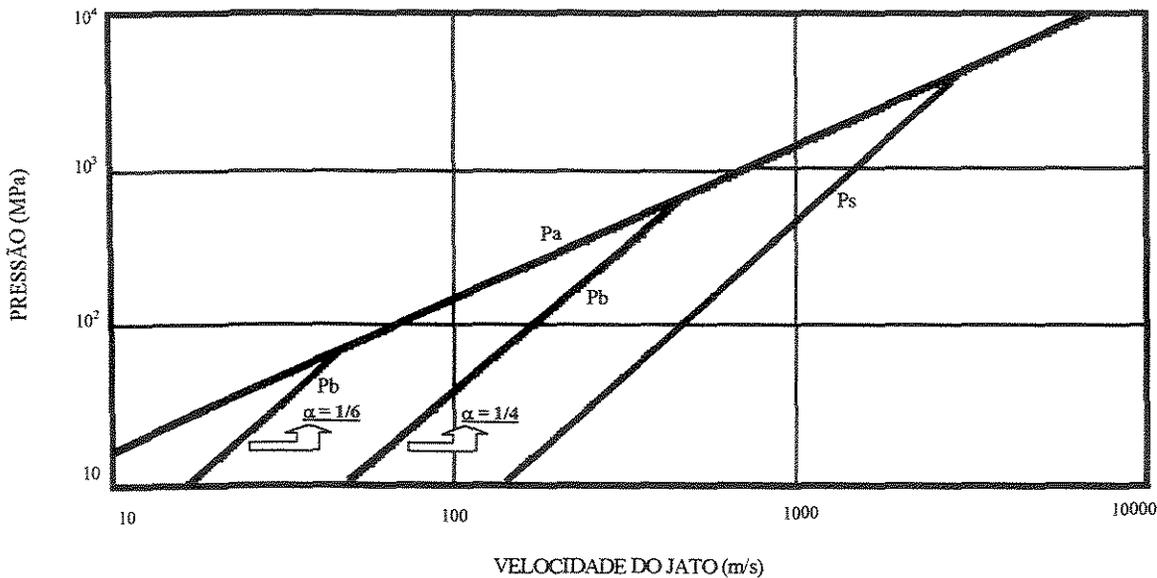


Figura 7.3. Níveis de pressão em um jato de água.

Fonte - HOULSTON e VICKERS (1978).

Para o equipamento tipo jato cavitante deste trabalho, serão calculados os valores de  $(Pb)$  e  $(Pa)$  para avaliar  $(R^*)$ . Considerando-se que a velocidade do som na água  $(c)$  a temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  é de  $1482\text{m/s}$  e a velocidade do jato  $(ve)$  nos ensaios do equipamento proposto neste trabalho é de  $89,3\text{ m/s}$ , da Equação (7.2) resulta o valor de  $(Pa)$  igual a  $132,11\text{MPa}$ . Do gráfico da Figura 7.3, com o valor de  $(Pa)$  e  $(ve)$ , obtém-se o valor típico de  $\alpha = 1/4$ . O valor de  $(Pb)$  pode ser obtido diretamente do gráfico ou substituindo os valores existentes na Equação (7.4). Pela Equação (7.4) tem-se que  $Pb=34,2\text{MPa}$ . Substituindo-se  $(Pa)$  e  $(Pb)$  na equação (7.5), calcula-se a eficiência do equipamento,  $R^* \approx 0,259$ .

HOULSTON e VICKERS (1978) relacionaram a variação de  $(R^*)$  com o tamanho do orifício, encontrando para a pressão de  $20,7\text{MPa}$  e diâmetros de  $0,4\text{mm}$ ,  $0,8\text{mm}$  e  $1,6\text{mm}$ , respectivamente, os seguintes valores de  $(R^*)$ ,  $0,023$ ,  $0,042$  e  $0,45$ . Considerando a variação de  $(R^*)$  com a pressão e orifício de  $1,6\text{mm}$ , obtiveram para  $30,5\text{MPa}$ ,  $20,7\text{MPa}$ ,  $13,8\text{MPa}$  e  $6,9\text{MPa}$ , as razões de  $0,60$ ,  $0,45$ ,  $0,063$  e  $0$ . 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 ( $R^*$ ), aumentaram com diâmetro do orifício empregado e também com o aumento da pressão.

Comparando-se os valores de eficiência do trabalho de HOULSTON e VICKERS (1978) com o valor obtido neste trabalho, a eficiência obtida com o uso do bocal de 3,00mm está de acordo 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.

### 7.2.3 COMPARAÇÃO COM OUTROS EQUIPAMENTOS

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 realizaram 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  $1,7\text{m}^3/\text{s}$ . 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.

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  $3,8 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$  e motor de 3730 W. A distância entre a amostra e um orifício era de 0,051m. Os autores

realizaram, com essas condições, ensaios de concretos recobertos por materiais especiais. Também, efetuaram testes com o Venturi, sob uma carga de 137m e vazão de  $0,5\text{m}^3/\text{s}$ , 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.

GIKAS (1981), realizou ensaios de concreto submetidos à cavitação com o 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. Assim, a altura manométrica e vazão foram aumentadas para 50mca e 150 l/s para diminuir os tempos dos ensaios. O reservatório para este equipamento não se mostrou como problema, pois o laboratório do CTH dispunha de reservatório de dimensões condizentes com a vazão requerida. Também, as dimensões do aparelho estavam de acordo com o espaço disponível. O equipamento do autor apresentava aproximadamente 25m de comprimento e diâmetro de tubulação de 0,2m.

Outros equipamentos citados na literatura como os de LICHTAROWICZ (1979), CONN et al (1984), BONAZZI e FOURNIER (1988) e BOUDIA et al (1997) utilizaram o fenômeno do aparecimento de cavitação para ensaios em diferentes situações e materiais.

De acordo com o que foi apresentado, pode concluir-se que os dispositivos Venturi requerem bomba de grande capacidade, tempo de ensaio longo e espaço que não está disponível em todos os laboratórios.

O equipamento que foi desenvolvido e ensaiado neste trabalho, em contrapartida, requer bomba especial de alta pressão, pouca vazão e tempo curto de ensaio. Deve ser lembrado que com 50 minutos de ensaio em amostra de concreto de alta resistência (43,00MPa) já foi constatado dano visível.

Pode concluir-se, portanto, que o uso deste equipamento de ensaio reduz custos de instalação e tempo de ensaio quando comparado a um dispositivo convencional. O equipamento

proposto neste trabalho ocupou, parcialmente, uma sala de aproximadamente 12,5m<sup>2</sup>. Além disso, pelas suas características, a instalação propicia flexibilidade para seu manuseio.

#### 7.2.4 EFEITO DO TEMPO DE ENSAIO E DESGASTE NAS AMOSTRAS

No equipamento proposto e testado neste trabalho, obtendo-se um índice de cavitação na saída do bocal  $\sigma_j=0,86$ , foi possível verificar fossa de erosão estável para as amostras de resistência menor (amostras 2, 3 e 4) em tempo inferior a uma hora. 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. Também, se a bomba permitisse alcançar valores de pressão compatíveis para obtenção de  $(\sigma_j)$  em torno de 0,15, 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.

Nos ensaios com as amostras de aço carbono no equipamento tipo jato cavitante proposto, 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.

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.

No aço, o colapso de inúmeras cavidades de vapor perpendicular à superfície produz uma textura granulosa. 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. Porém ao longo de um conduto de descarga, a textura é de um granulado mais grosseiro, porque as bolhas que implodem são maiores. Tal fato pode ser verificado em concreto nas Figuras 7.4 (a) e (b) de acordo com FALVEY (1990). Comparando a Figura 7.4 (a) com a resultante dos ensaios com o emprego de jato cavitante (Fotos 7.2, 7.4, 7.6 e 7.8) pode constatar-se a semelhança das mesmas.

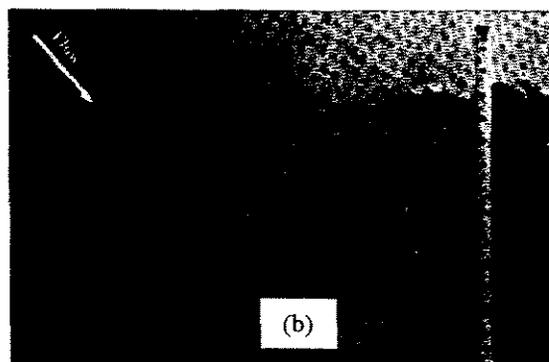
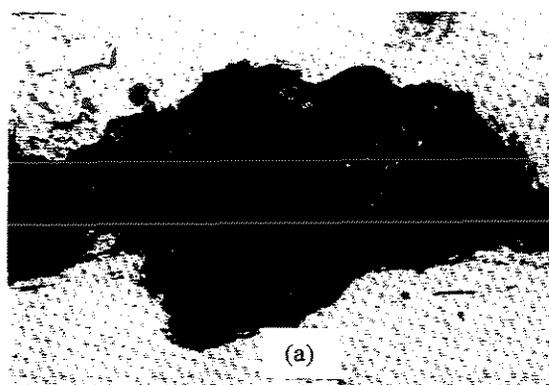


Figura 7.4 (a). Dano por cavitação produzido em dispositivo Venturi.

Figura 7.4 (b). Início do dano no túnel vertedor da barragem Hoover, Nevada.

Fonte - FALVEY (1990).

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. No trabalho experimental realizado por DALFRÉ FILHO, GENOVEZ e PAULON (2000) foram ensaiadas amostras de alto desempenho com diferentes traços e agregados, que receberam adições de microssilica e nanossilica. O desgaste 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, com o mesmo traço da amostra 1, com resistência de 43,00MPa, apresentou 0,783 % de desgaste, após 72 horas de ensaio.

Segundo FALVEY (1990) não foram desenvolvidas correlações que especifiquem a quantidade de material atacado, de um dado material, para um especificado índice de cavitação. Entretanto, para expressar a resistência de um material com relação à resistência de outros materiais, para uma dada condição de cavitação é possível. Por exemplo, cita que em um experimento com Venturi a cavitação produziu uma erosão de 13mm de profundidade no concreto após três horas de exposição a uma velocidade de 30 m/s. O mesmo dano ocorreu em um concreto com polímeros após 125 horas, e em aço inoxidável após 6000 horas. O aço carbono obteve o mesmo desgaste 7 horas antes do aço inoxidável, o alumínio, 25 horas antes do aço inoxidável. A Figura 7.5 mostra a curva do dano relativo para materiais normalmente usados em estruturas hidráulicas, seja na construção como nos reparos.

Os danos devido à cavitação que ocorrem normalmente nas estruturas hidráulicas, são função do índice de cavitação e do número de horas de operação da estrutura. Pode-se visualizar estes efeitos através da Figura 7.6, onde são relacionados os danos, o índice de cavitação e as horas de operação da estrutura hidráulica.

GIKAS (1981) obteve danos para um ( $\sigma$ ) de 0,25 e tempos de ensaios das amostras de concreto variando de 39 a 61 horas, que era o tempo em que o autor realizava a estagnação da taxa de erosão.

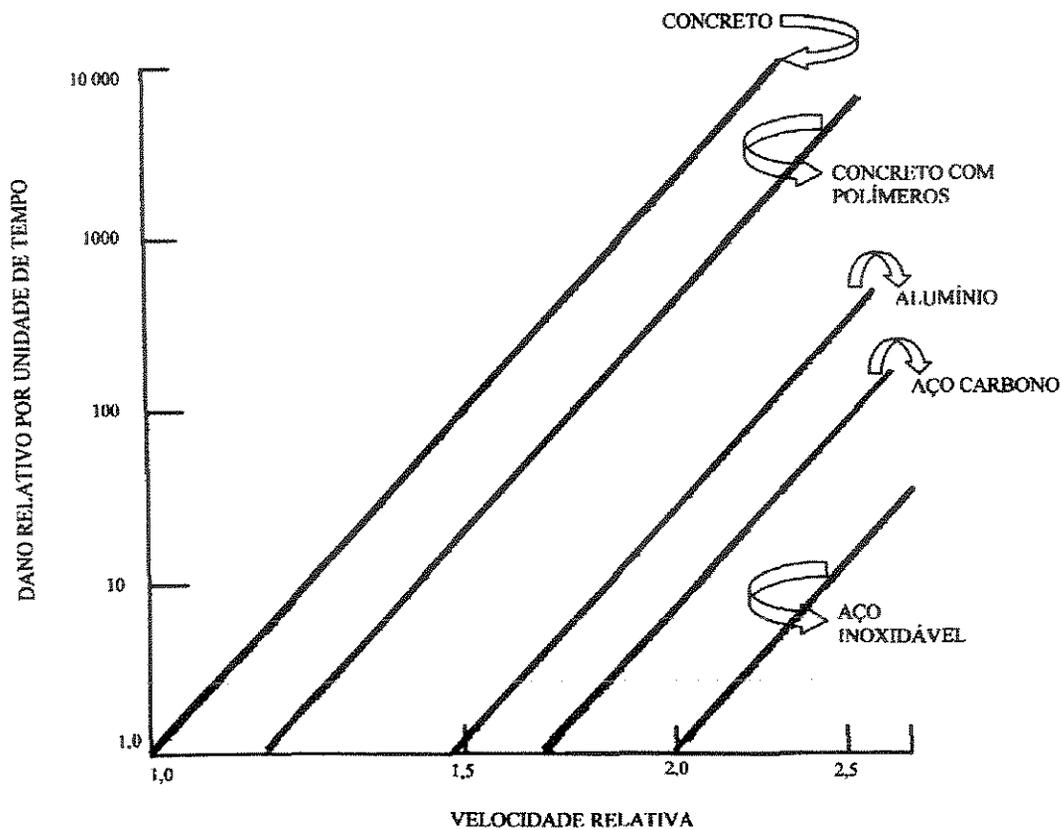


Figura 7.5. Resistência à cavitação comparativa entre vários materiais.  
 Fonte - FALVEY (1990).

QUINTELA e RAMOS (1980) relatam os resultados dos ensaios do U.S. Corps of Engineers à erosão de cavitação, de concretos comuns, concretos com fibras de aço, concretos impregnados de polímeros e impregnados de polímeros com fibras de aço. Os concretos comuns e com fibras de aço ensaiados, apresentavam respectivamente as resistências a compressão aos 28 dias de 31,6MPa e 42,2MPa. Não são mencionadas as resistências dos demais concretos especiais.

Como resultado, é relatado que para as lajes de concreto com fibras e lajes impregnadas de polímeros é necessário um tempo de ensaio superior em três vezes ao da laje com concreto comum para atingir a mesma profundidade de erosão de 75mm. O concreto impregnado de

polímeros com fibras de aço ao fim de 200 horas de ensaio apresentou uma profundidade de erosão de apenas 25 mm. O concreto comum apresentou esta mesma profundidade ao fim de apenas 10 horas. Apesar de não fornecido o valor de  $\sigma$  destes ensaios, é possível calculá-lo com os dados apresentados, estando em torno de 0,28.

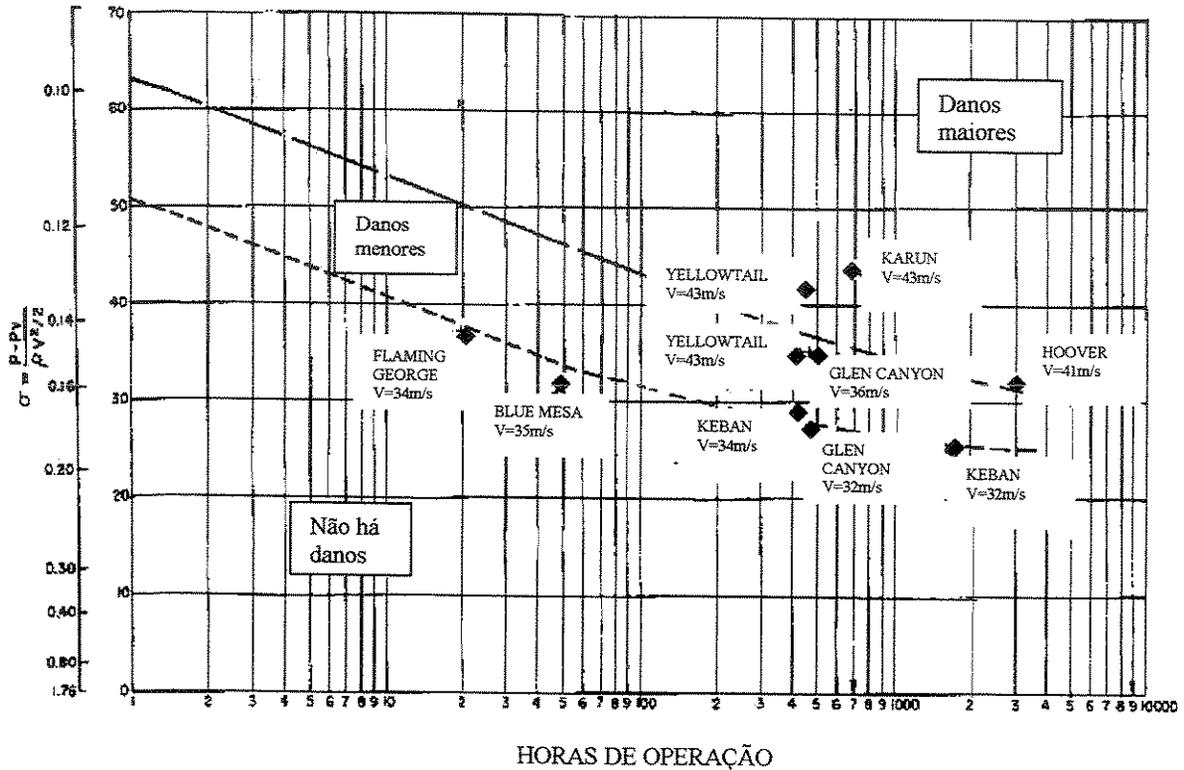


Figura 7.6. Desenvolvimento de danos em vertedores.

Fonte - FALVEY (1990).

O critério para avaliar as resistências das amostras de CHENG, WEBSTER e WONG (1990), foi através da pressão requerida para produzir dano visível após um minuto de ensaio. As amostras ensaiadas possuíam resistência à compressão axial aos 28 dias em torno de 40,0MPa. Essas amostras receberam tipos de recobrimento diferentes, como poliuretano e epóxi.

Não é possível calcular o valor de  $\sigma$  para estes ensaios, pois não se conhecem os diâmetros dos orifícios utilizados. Analisando as magnitudes de pressão utilizadas pelos autores, supõe-se que o índice de cavitação deve ser menor do obtido pelo trabalho aqui proposto.

HOULSTON e VICKERS (1978) utilizaram amostras de alumínio em seus ensaios, durante um tempo fixo de 5 minutos. Os autores descrevem dois picos de erosão nos corpos de prova, um devido à cavitação, mais estreito, e um segundo, mais largo, devido às gotículas. Constataram que para a pressão de 34,5MPa e diâmetro de 1,6mm a penetração na amostra de alumínio para cavitação foi 1,2 vezes maior que para o impacto. O resultado contradiz a conclusão de que os danos por cavitação se sobrepõem aos de impacto para diâmetros e pressões maiores. Este fato, então, levou os autores a concluir que a cavitação só ocorre para certas combinações de diâmetros e velocidades, mesmo para bocais bem projetados. Para todas as outras condições, a erosão devido ao impacto foi superior a da cavitação, por pelo menos um fator de dois. Não foram fornecidos os intervalos de valores de índice de cavitação neste trabalho. Para obtê-los seria necessário conhecer as perdas do sistema, porém, pela magnitude de pressões e diâmetros de orifícios, devem ter sido utilizados valores baixos do índice de cavitação.

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.

Em relatos dos danos causados por cavitação em estruturas hidráulicas e as conseqüentes medidas de reparos como constataram TATRO et al (1994), observa-se que apenas nos casos onde aeradores foram propostos, houve preocupação em testar o material de reparo. Significa que ensaios com concretos especiais para reparos foram pura conseqüência e não o foco. Quando se propuseram as substituições do concreto erodido por outros mais resistentes, não houve ensaios. Após alguns anos de uso, constatava-se se os reparos foram bem sucedidos ou não.

Percebe-se que, mesmo para reparos realizados em estruturas hidráulicas em períodos relativamente recentes, não houve preocupação em testar os materiais a serem aplicados. Todavia, se houvesse a preocupação em testá-los poder-se-ia evitar problemas após o uso destas estruturas.

De acordo com os testes efetuados, pode constatar-se que a melhor amostra é aquela de alta resistência como era de se prever. Em caso de se atingir a fossa de erosão visível, além da contagem de pits poderia se correlacionar a perda de peso das amostras, que nos casos ensaiados não foi significativa. A textura resultou rugosa com arrancamento dos agregados.

Conclui-se, portanto, que para obtenção de desgaste nas amostras de concreto é necessário uma combinação de tempo de ensaio, características da amostra (resistência e componentes) e valores apropriados do índice de cavitação ( $\sigma$ ). Com a redução do valor de ( $\sigma$ ), 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. Deve destacar-se também que deverão ser feitos testes com outros tipos de amostras de concretos especiais, para definir a melhor performance e poder empregar com eficiência, tanto na construção como no reparo das estruturas sujeitas a este tipo de situação.

## 8 CONCLUSÕES

As estruturas hidráulicas estão sujeitas a 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. 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. Portanto, trabalhos de reparo incluem a substituição daquele concreto por outros, mais resistentes, com características especiais e também tratamento das superfícies adequadas.

No trabalho experimental desenvolvido foi proposto e testado o equipamento 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.

Sugere-se que o fabricante da bomba de deslocamento direto substitua o material ferro fundido, por material mais resistente, o que evitaria rompimentos e a possibilidade da sua utilização por tempo mais longo. Caso o equipamento o permitisse, todas amostras teriam sido levadas até a fossa de erosão visível. Também, a instalação de válvula de alívio significaria mais segurança e agilidade nos reparos, no caso de as pressões atingirem valores maiores que aqueles suportados.

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.

Para a indicação de concretos para o uso nas estruturas hidráulicas através de testes com o equipamento tipo jato cavitante, quer seja na sua construção ou em reparos, exige 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, mas 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.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASOGLU, C.; OKAY, G. The remedial structures on the spillway of Keban dam. **Int. Water Power and Dam Construction**, U.K., v.44, n.12, p.22-27, december 1992.

AMBLARD, A.; BONAZZI, A.; LECOFFRE, Y. Dèveloppements récents d'une méthode de prévision de l'érosion de cavitation. **La Houille Blanche**, Paris, année 43, n.292, p.577-580, juillet/aout 1988.

AVELLAN, F.; FARHAT, M. Dynamique des cavités érosives: étude du collapse des vortex cavitants. **La Houille Blanche**, Paris, année 43, n.292, p. 527-533, juillet/aout 1988.

BALL, J.W.; TULLIS, J.P.; STRIPLING, T. Predicting cavitation in sudden enlargements. **Journal of the Hydraulics Division**, v.101, n.HY7, p.857-870, july 1975.

BALL, J.W. Cavitation from surface irregularities in high velocity. **Journal of the Hydraulics Division**, v.102, n. HY9, p.1283-1297, september 1976.

BILLARD, J.Y.; FRUMAN, D.H. Etude expérimentale de l'influence d'un champ de pression fluctuant sur l'apparition de la cavitation dans un venturi. **La Houille Blanche**, Paris, année 47, n.316, juillet/aout 1992.

BISTAFA, S.R. Mecanismos de erosão gerados pela cavitação. In: **Encontro sobre Oscilatórios em Equipamentos Hidromecânicos**, 1994, EFEI. Itajubá: [s.n.],1994. 6<sup>a</sup> Sessão de Trabalho, p.1-18.

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.

BOUVARD, M. Cavitation et évacuateurs de crues des grands barrages. **La Houille Blanche**, Paris, année 52, n.342, p.70-73, avril/mai 1997.

CARVALHO, E.; ALMEIDA, F.M. e FARIA, E.O. Cavitação em bacia de dissipação dotada de blocos de queda. **RBE, Caderno de Recurso Hídricos**, Rio de Janeiro, v.10, n.1, p.55-74, 1992.

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.

CONN et al. Some unusual applications for cavitating water jets. In: **International Symposium on Jet Cutting Technology**, 7<sup>o</sup>, 1984, Ottawa. Jet Cutting Technology. Cranfield: BHRA The Fluid Engineering Centre, june,1984. p.1-12.

DALFRÉ FILHO, J.G.; GENOVEZ, A.I.B; PAULON, W.A. Desgaste nas superfícies hidráulicas e a resistência a abrasão do concreto. **Ingeniería Estructural**. Buenos Aires, año 8, n.20, p.18-22, agosto 2000.

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-april 1987.

GREIN, H.; SCHACHENMANN, A. Solving problems of abrasion in hydroelectric machinery. **Int. Water Power and Dam Construction**. U.K. v.44, n.8, p.19-24, august 1992.

GRISHIN, M.M. **Hydraulic Structures**. Vol.1. 2.ed. Moscou: Mir, 1987. 468p.

HUOVINEN, S. Abrasion of concrete structures by ice. **Cement and Concrete Research**. Oxford, v.23, n.1, p.69-82, january 1993.

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.

JEANNEROD, D.; NICOLE, E. Erosion-cavitation dans les perçages de refoulement des pompes d'injection de diesels industriels. **La Houille Blanche**, Paris, année 53, n.349, p.35-41, mai/juin 1998.

LAMOND, J.F. Designing for durability. **Concrete International**, Farmington Hills, v.19, n.11, p.34-36, november 1997.

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.

LIU, T.C. Abrasion resistance of concrete. **American Concrete Institute**. Detroit, v.78, n.5, p.341-350, september- october 1981.

LUSCH, P.A.; EWUNKEM, A.E. Cavitation erosion of engineering materials. In: **Conference on Cavitation**, 3º, 1992. Cambridge, UK. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, p.95-102.

MARCHANTE, J.O.; ROSÁRIO, L.C.; BRAGA, J. A. Resistência a abrasão da superfície do concreto. In: **Colóquio sobre concreto massa**, 1983, São Paulo. IBRACON. Jun/julho 1983. p1-29 (T20).

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J. **Concreto: Estrutura, Propriedade e Materiais**. 1.ed. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

NEALE, K.W.; LABOSSIÈRE, P. Fiber composite sheets in cold climate rehabilitation. **Concrete International**, Farmington Hills, v.20, n.6, p.22-30, june 1998.

NEVILLE, A. Maintenance and durability of structures. **Concrete International**, Farmington Hills, v.19, n.11, p.52-56, november 1997.

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)

TATRO, S.B. et al; ACI Committee Report 210.1R-94. **Compendium of Case Histories on Repair of Erosion Damaged Concrete in Hydraulic Structures**. 1.ed. Detroit: American Concrete Institute, november, 1994. 33p.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION- **Concrete Manual**. 8.ed. Denver, 1981.

## **ABSTRACT**

DALFRÉ FILHO, José Gilberto. **Equipment development for Evaluation of Cavitation Erosion**. Campinas: College of Civil Engineering, University of Campinas, 2002, 97 pages. Dissertação, Mestrado.

Cavitation in hydraulic structures is particularly important and especially the superficial areas must be resistant. In many cases the provoked damage is so great that it reduces the useful life of the structure and also compels long periods of functioning interruption. The erosion provoked for this phenomenon comes followed of other undesirable effect, such as structural vibrations and noise. The objective of this work was to develop an equipment that allows to evaluate cavitation erosion in concrete samples used in hydraulic structures. The test bank was assembled using direct shift and centrifugal pumps. The equipment with the direct shift pump allowed the development of the cavitation. The equipment revealed adequate for the accomplishment of concrete resistances tests. Visible damage in the samples was obtained with very lesser times comparing with other devices, therefore allowing energy and workmanship saving. The installation with the use of the centrifugal pump was not satisfactory. One concludes that for attainment cavitation erosion in concrete samples it is necessary a combination of test time, features of the sample (resistance and components) and appropriate values of the cavitation index. Tests with special concrete samples should be necessary to define the best performance in order to make efficient construction and repair of the hydraulic structures.

**Key Words: Cavitation – Erosion – Hydraulic Structures**