

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

EQUIPAMENTO TIPO JATO CAVITANTE PARA
AVALIAÇÃO DE DESGASTE POR CAVITAÇÃO

Eng.º José Gilberto Dalfré Filho

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Ana Inés Borri Genovez

Tese de Doutorado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Campinas, SP

2005

ii

Atesto que essa é a versão definitiva da
dissertação/tese.
Prof. Dr. Ana Inés Borri Genovez
Matrícula 054721 - 25/07/2005

200517044

UNIDADE BC
Nº CHAMADA TIUNICAMP
D156e

V _____ EX _____
TOMBO BC/ 65313
PROC 16.86.05
C _____ D 14
PREÇO 11.000,00
DATA 07.08.05
Vº CPD _____

Bibid 358630

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

D156e Dalfré Filho, José Gilberto
Equipamento tipo jato cavitante para avaliação de
desgaste por cavitação / José Gilberto Dalfré Filho.--
Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Ana Inés Borri Genovez.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Erosão. 2. Cavitação. 3. Estruturas hidráulicas. I.
Genovez, Ana Inés Borri. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: Cavitating jet apparatus for evaluation of cavitation erosion

Palavras-chave em Inglês: Erosion, Cavitation, Hydraulic structures

Área de concentração: Recursos Hídricos

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: José Junji Ota, Yvone de Faria Lemos de Lucca, Edevar

Luvizotto Júnior, Paulo Vatavik

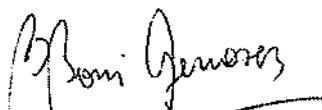
Data da defesa: 07/07/2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

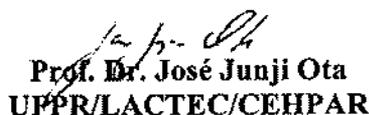
EQUIPAMENTO TIPO JATO CAVITANTE PARA AVALIAÇÃO
DE DESGASTE POR CAVITAÇÃO

Eng^o José Gilberto Dalfré Filho

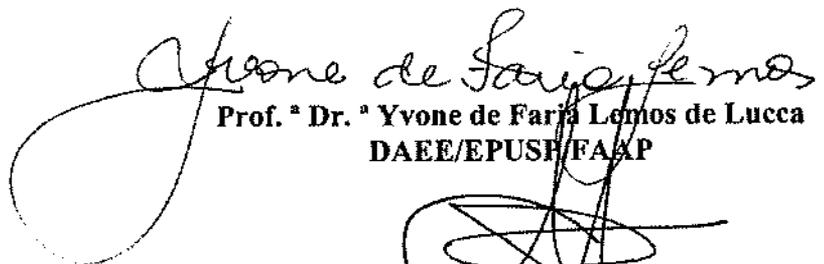
Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof. ^a Dr. ^a Ana Inés Borri Genovez
Presidente e Orientadora/ FEC-UNICAMP



Prof. Dr. José Junji Ota
UPPR/LACTEC/CEHPAR



Prof. ^a Dr. ^a Yvone de Faria Lemos de Lucca
DAEE/EPUSP/FAAP



Prof. Dr. Edevar Luvizotto Júnior
FEC-UNICAMP



Prof. Dr. Paulo Vatauk
FEC-UNICAMP

Campinas, 07 de julho de 2005.

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão, por todo apoio e compreensão que recebi.

AGRADECIMENTOS

A FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento desta pesquisa, através de Auxílio à Pesquisa (Proc. 02/10348-0);

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de pesquisa no período de julho de 2002 a março de 2003;

A UNICAMP pela bolsa do Programa Piloto para Instrutores Graduados no período de março de 2003 a julho de 2005;

Aos Professores do Departamento de Recursos Hídricos da FEC pela confiança em meu trabalho, em especial a Prof. ^a Ana Inés Borri Genovez pelos ensinamentos e paciência que me incentivaram no transcurso destes estudos;

A Prof. ^a Yvone de Faria Lemos de Lucca pelas orientações na instrumentação da bancada de testes;

Ao Prof. Mário Conrado Cavicchia pelas orientações no desenvolvimento do bocal logarítmico;

Aos amigos, Paula A. Carteadó e Luís Ferreira pela ajuda no desenvolvimento dos ensaios;

A HANNA INDÚSTRIA MECÂNICA LTDA, representada pelo Diretor Comercial Sr. Eduardo Hanna, pela verificação geométrica dos bocais.

Ao Orávio Servidone pela preocupação na execução da estrutura da bancada;

Aos técnicos dos laboratórios da FEC que auxiliaram no desenvolvimento destes ensaios;

“A perfeição não é alcançada quando não há nada mais a se acrescentar, mas quando não há nada mais a ser retirado”.

(Antoine de Saint-Exupéry)

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| LISTA DE QUADROS | ix |
| LISTA DE FIGURAS | x |
| LISTA DE FOTOS | xiii |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xiv |
| RESUMO | xvi |
| ABSTRACT | xvii |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 GENERALIDADES..... | 1 |
| 1.2 ORDENAÇÃO DO TRABALHO..... | 3 |
| 2 OBJETIVO | 5 |
| 3 CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DA CAVITAÇÃO | 7 |
| 3.1 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO..... | 7 |
| 3.2 PARÂMETRO DE CAVITAÇÃO..... | 9 |
| 3.3 O PAPEL DOS NÚCLEOS..... | 16 |
| 3.4 FONTES DE BAIXA PRESSÃO..... | 17 |
| 3.5 LIMITES DE CAVITAÇÃO..... | 19 |
| 3.6 COMENTÁRIOS..... | 21 |
| 4 PRINCIPAIS PESQUISAS PARA SIMULAÇÃO DA CAVITAÇÃO EM LABORATÓRIO | 23 |

| | |
|--|------------|
| 4.1 EQUIPAMENTOS EXISTENTES PARA A AVALIAÇÃO DA EROÇÃO POR CAVITAÇÃO..... | 23 |
| 4.2 COMENTÁRIOS..... | 53 |
| 5 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 55 |
| 5.1 BANCADA DE ENSAIO..... | 55 |
| 5.2 TIPOS DE BOCAIS..... | 59 |
| 5.3 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO..... | 61 |
| 5.4 MÉTODO DE ENSAIO..... | 61 |
| 5.4.1 PRIMEIRA FASE DOS ENSAIOS..... | 64 |
| 5.4.2 SEGUNDA FASE DOS ENSAIOS..... | 64 |
| 6 RESULTADOS E ANÁLISE..... | 67 |
| 6.1 RESULTADOS..... | 67 |
| 6.1.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE DOS ENSAIOS..... | 67 |
| 6.1.1.1 DISTÂNCIA ENTRE O BOCAL E A AMOSTRA..... | 70 |
| 6.1.1.2 TIPOS DE BOCAIS..... | 74 |
| 6.1.2 RESULTADOS DA SEGUNDA FASE DOS ENSAIOS..... | 79 |
| 6.2 ANÁLISE..... | 93 |
| 6.2.1 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO EQUIPAMENTO..... | 93 |
| 6.2.2 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO..... | 96 |
| 6.2.3 MECANISMOS DE EROÇÃO E DEPENDÊNCIA DA TAXA DE “PITTING” COM O TEMPO..... | 97 |
| 6.2.4 RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E OS DANOS DEVIDOS À CAVITAÇÃO..... | 104 |
| 6.2.5 RELAÇÃO ENTRE A TAXA DE EROÇÃO E OS TEMPOS DE ENSAIOS..... | 106 |
| 7 CONCLUSÕES..... | 111 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 115 |
| ANEXO A - Procedimento de ensaio..... | 121 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 4.1. Especificações dos bocais e condições de ensaios..... | 35 |
| Quadro 5.1. Especificações dos equipamentos de medição utilizados nesta pesquisa..... | 62 |
| Quadro 5.2. Características das amostras de concreto usadas nos ensaios..... | 65 |
| Quadro 6.1. Desgastes nas amostras de alumínio..... | 71 |
| Quadro 6.2 (a). Desgastes nas amostras de alumínio com o emprego dos bocais em arestas vivas..... | 75 |
| Quadro 6.2 (b). Desgastes nas amostras de alumínio com o emprego dos bocais em arestas chanfradas..... | 76 |
| Quadro 6.3 (a). Danos na amostra de concreto A..... | 84 |
| Quadro 6.3 (b). Danos na amostra de concreto B..... | 84 |
| Quadro 6.3 (c). Danos na amostra de concreto C..... | 85 |
| Quadro 6.4 (a). Profundidade de erosão na amostra A..... | 88 |
| Quadro 6.4 (b). Profundidade de erosão na amostra B..... | 89 |
| Quadro 6.4 (c). Profundidade de erosão na amostra C..... | 89 |
| Quadro 6.5. Eficiência dos equipamentos em função do tipo de bocal..... | 96 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3.1. Diagrama de fases da água..... | 8 |
| Figura 3.2. Condições de equilíbrio para cavidades de vapor..... | 10 |
| Figura 3.3 Distribuição de pressões em um corpo hemisférico submerso..... | 11 |
| Figura 3.4. Padrão do escoamento para o caso de um jato submerso..... | 19 |
| Figura 3.5. Linha de gradiente hidráulico para cavitação com bloqueio..... | 20 |
| Figura 4.1. Equipamento utilizado por Leach e Walker (1966)..... | 24 |
| Figura 4.2. Esquema do jato incidindo sobre o anteparo durante os ensaios..... | 25 |
| Figura 4.3. Corte esquemático dos bocais usados por Leach e Walker (1966)..... | 25 |
| Figura 4.4. Esquema do aparelho desenvolvido por Houlston e Vickers (1978)..... | 28 |
| Figura 4.5. Bocais utilizados nos testes do aparelho de Houlston e Vickers (1978)..... | 30 |
| Figura 4.6. Detalhe do aparelho de Lichtarowicz (1979)..... | 31 |
| Figura 4.7. Instalação utilizada nos ensaios de cavitação de Gikas (1981)..... | 33 |
| Figura 4.8. Detalhe do difusor utilizado na instalação de Gikas (1981)..... | 33 |
| Figura 4.9. Detalhe do orifício Cavijet, desenvolvido por Conn et al (1984)..... | 34 |
| Figura 4.10. Esquema da bancada de ensaios de Avellan e Farhat (1988)..... | 37 |
| Figura 4.11. Diagrama esquemático do túnel de cavitação utilizado por Coleman et al (1995) nos ensaios. (a) vista lateral; (b) planta..... | 41 |
| Figura 4.12. Diagrama esquemático do teste com jato cavitante utilizado por Coleman et al (1995)..... | 41 |
| Figura 4.13. Esquema da instalação de Ikohagi et al (1996)..... | 43 |
| Figura 4.14. Bocais utilizados por Ikohagi et al (1996); (a) Bocal cônico; (b) Bocal cilíndrico; (c) Bocal divergente..... | 44 |
| Figura 4.15. Esquema da câmara de cavitação utilizada por Momber (2000)..... | 51 |
| Figura 4.16. Esquema do banco utilizado por Dalfré Filho (2002)..... | 53 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.1. Esquema da bancada de testes utilizada neste trabalho..... | 56 |
| Figura 5.2. Esquema dos componentes da instalação..... | 58 |
| Figura 5.3. Esquema dos bocais utilizados nos ensaios..... | 60 |
| Figura 5.4. Posição da instrumentação na bancada de testes..... | 63 |
| Figura 6.1. Evolução das taxas de erosão às distâncias de 0,05 m, 0,10 m e 0,15 m..... | 71 |
| Figura 6.2. Impacto registrado pela célula de carga à distância de 0,05 m..... | 73 |
| Figura 6.3. Impacto registrado pela célula de carga à distância de 0,10 m..... | 73 |
| Figura 6.4. Impacto registrado pela célula de carga à distância de 0,15 m..... | 74 |
| Figura 6.5 (a). Desgaste das amostras de alumínio com o emprego dos bocais em arestas vivas..... | 77 |
| Figura 6.5 (b). Desgaste das amostras de alumínio com o emprego dos bocais em arestas chanfradas..... | 77 |
| Figura 6.6 (a). Desgaste sofrido pela amostra A..... | 85 |
| Figura 6.6 (b). Desgaste sofrido pela amostra | 86 |
| Figura 6.6 (c). Desgaste sofrido pela amostra C..... | 86 |
| Figura 6.7 (a). Evolução do desgaste nas amostras A, B e C com o uso do bocal cônico de 20°..... | 87 |
| Figura 6.7 (b). Evolução do desgaste nas amostras A, B e C com o uso do bocal cônico de 132°..... | 88 |
| Figura 6.7 (c). Evolução do desgaste nas amostras A, B e C com o uso do bocal circular..... | 88 |
| Figura 6.8 (a). Profundidade de erosão nas amostras A, B e C com o uso do bocal cônico de 20°..... | 89 |
| Figura 6.8 (b). Profundidade de erosão nas amostras A, B e C com o uso do bocal de 132°..... | 90 |
| Figura 6.8 (c). Profundidade de erosão nas amostras A, B e C com o uso do bocal circular..... | 90 |
| Figura 6.9. Aceleração registrada por acelerômetro em ensaio com jato cavitante..... | 92 |
| Figura 6.10. Níveis de pressão em um jato de água..... | 94 |
| Figura 6.11. Modelo de aceleração dos danos devido à onda de choque..... | 101 |

Figura 6.12. Resistência à cavitação comparativa entre vários materiais.....108

LISTA DE FOTOS

| | |
|---|-----|
| Foto 4.1. Fotos das amostras usadas por Momber (2000) após o ensaio com duração de 10s;(a) Aumento de 7x; (b) Aumento de 17x..... | 51 |
| Foto 5.1. Bancada de testes utilizada neste trabalho..... | 57 |
| Foto 6.1. Erosão de cavitação em amostras de alumínio (aumento de 100x)..... | 72 |
| Foto 6.2. Evolução dos danos em amostra de alumínio-aumento de 100x..... | 78 |
| Foto 6.3. Efeito da cavitação, em amostra de alumínio..... | 78 |
| Foto 6.4. Evolução da erosão na amostra de concreto B (bocal cônico de 132°)..... | 80 |
| Foto 6.5. Evolução da erosão na amostra de concreto C (bocal cônico de 132°)..... | 81 |
| Foto 6.6. Evolução da erosão na amostra de concreto B,com o uso do bocal circular..... | 82 |
| Foto 6.7. Evolução da erosão na amostra de concreto C,com o uso do bocal circular..... | 83 |
| Foto 6.8. Dano em amostra de concreto..... | 85 |
| Foto 6.9. Dano em amostra de concreto..... | 86 |
| Foto 6.10. Dano em amostra de concreto..... | 87 |
| Foto 6.11. Erosão em concretos: (a) jato livre; (b) jato submerso..... | 92 |
| Foto 6.12. Visualização do jato cavitante (frequência de 167 Hz)..... | 102 |
| Foto 6.13 Visualização do jato cavitante (frequência de 83,3 Hz)..... | 102 |
| Foto 6.14. Aspecto do jato ultra-rápido (frequência de 208,30 Hz)..... | 109 |
| Foto 6.15. Aspecto dos filamentos de vórtices ao redor do jato (frequência de 166,67 Hz)..... | 109 |

LISTA DE SÍMBOLOS

A: coeficiente de ajuste

B: coeficiente de ajuste

c: celeridade $(M)^0 (L) (T)^{-2}$

C_p : coeficiente de pressão $(M)^0 (L)^0 (T)^0$

D: diâmetro do orifício $(M)^0 (L) (T)^0$

l : comprimento do trecho retilíneo do bocal $(M)^0 (L) (T)^0$

L_e : comprimento do desenvolvimento da camada limite $(M)^0 (L) (T)^0$

P_a : pressão do golpe de ariete $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

P_b : pressão de impacto de um jato cavitante $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

p_b : pressão absoluta da cavidade ou bolha $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

p_d : pressão a jusante $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

p_o : pressão de referência absoluta $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

P_s : pressão de um jato incidindo normalmente a uma superfície $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

p_u : pressão a montante $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

p_v : pressão de vapor $(M) (L)^{-1} (T)^{-2}$

r: medida na ordenada;

R^* : eficiência do desgaste por cavitação $(M)^0 (L)^0 (T)^0$

T: temperatura $(M)^0 (L)^0 (T)^0 (K)$

v_o : velocidade de referência $(M)^0 (L) (T)^{-2}$

x: medida na abscissa;

X: distância do centro da bolha à superfície $(M)^0 (L) (T)^0$

M_a : número de Mach $(M)^0 (L)^0 (T)^0$

\Re_D : número de Reynolds $(M)^0 (L)^0 (T)^0$

W_e : número de Weber $(M)^0 (L)^0 (T)^0$

α : relação entre a pressão de gás dentro da bolha
no início de colapso e a pressão P_s (M)⁰ (L)⁰ (T)⁰

γ : peso específico do fluido (M) (L)⁻² (T)⁻²

δ : espessura da camada limite (M)⁰ (L) (T)⁰

ε : rugosidade (M)⁰ (L) (T)⁰

ν : viscosidade cinemática da água (M)⁰ (L)² (T)⁻¹

ρ : massa específica (M) (L)⁻³ (T)⁰

σ : índice de cavitação (M)⁰ (L)⁰ (T)⁰

σ_c : índice de cavitação crítica (M)⁰ (L)⁰ (T)⁰

σ_i : índice de cavitação incipiente (M)⁰ (L)⁰ (T)⁰

σ_{sup} : tensão superficial (M) (L)⁰ (T)⁻²

RESUMO

DALFRÉ FILHO, José Gilberto. **Equipamento tipo jato cavitante para avaliação de desgaste por cavitação**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, 2005, 122 p. Tese, Doutorado.

O equipamento tipo jato cavitante utiliza um bocal especialmente projetado para simular o fenômeno da cavitação desgastando uma amostra em um período de tempo curto. Isso ocorre, sobretudo, devido à magnitude da velocidade. Para maior eficiência do jato cavitante é necessária uma combinação da geometria do bocal, do diâmetro do orifício e da pressão disponível. No caso das estruturas hidráulicas se verifica o efeito simultâneo do fenômeno da cavitação e do impacto de um jato de alta velocidade. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um equipamento tipo jato cavitante para avaliar o desgaste ocasionado pela cavitação em amostras de concreto. O estudo foi realizado no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil. A instalação permite variar os parâmetros de ensaio, de forma a obter a máxima eficiência do equipamento e definir o comportamento da amostra. O índice de cavitação de 0,14 é adequado aos ensaios em concretos de estruturas hidráulicas. Recomenda-se uma velocidade do jato em torno de 150 m/s, a adoção de 0,05 m de distância entre o bocal e a amostra e o uso de bocal cônico de 132°, com arestas vivas. A partir dos testes realizados, sugere-se um tempo de ensaio de quatro minutos para avaliação da resistência dos materiais face à ação da cavitação. Conclui-se que o equipamento tipo jato cavitante se mostrou adequado e eficiente para avaliação do desgaste provocado pela ação da cavitação, em um tempo curto de ensaio. As características do banco de ensaio permitem que ele seja instalado em laboratório ou em campo.

Palavras Chave: Equipamento Jato Cavitante - Cavitação - Erosão

ABSTRACT

DALFRÉ FILHO, José Gilberto. **Cavitating jet apparatus for evaluation of cavitation erosion**. Campinas: College of Civil Engineering, Architecture and Urbanism of the University of Campinas. 2005, 122 p. Tese, Doutorado.

The cavitating jet apparatus uses an especially projected nozzle to produce cavitation and have the advantage of induce cavitation flow with short time test. That is due, mainly, to the magnitude of velocity. In order to obtain great efficiency of the cavitating jet apparatus one has to combine the nozzle geometry, the orifice diameter and the necessary pressure. In hydraulic structures it is verified the simultaneous effect of the cavitation phenomenon and the impact of a high velocity jet. The objective of this work was to develop a cavitating jet apparatus to evaluate the erosion caused by cavitation in concrete samples. The study was carried out in the Hydraulics and Fluid Mechanics Laboratory of the Civil Engineering, Architecture and Urbanism College. The installation allows varying the tests parameters, to get the maximum efficiency of the equipment and to obtain the sample damage. A cavitation index of 0,14 showed to be a value where damage in hydraulics structures was presented. It is suggested to perform tests with a jet velocity of approximately 150 m/s, the adoption of 0,05 m of distance between the nozzle and the sample and also the use of conical 132° nozzle with sharp edges, which showed to be adequate to the laboratory experiment with concretes ordinarily used in hydraulic structures. According to the tests, it can be normalize the adoption of four minutes test for evaluation of the cavitation samples resistance. It is concluded that the cavitating jet apparatus is adequate and efficient for evaluation of erosion through cavitation action in a short time tests. The characteristics of the experimental installation allow its use either in laboratory or in field tests.

Key words: Cavitating Jet Apparatus - Cavitation - Erosion

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Os escoamentos nos túneis de descarga e vertedores fazem-se, geralmente, com elevadas velocidades. A experiência tem mostrado que, admitindo as superfícies de concreto com acabamentos adequados, os problemas advindos do surgimento da cavitação têm lugar para velocidades superiores a 30-35 m/s, dependendo do valor da pressão no escoamento. Nestas estruturas há diferentes tipos de irregularidades, como as microrugosidades próprias do acabamento das superfícies que podem determinar a ocorrência de cavitação, dependendo do seu tipo, tamanho e da velocidade do escoamento. Pode-se citar, também, as macrorugosidades tais como os defletores, mudanças de declividade e juntas.

Há casos em que os problemas com cavitação ocorrem com velocidades mais baixas, resultantes ou de turbulência provocada por ranhuras de comportas, pilares, blocos dispersores, blocos de amortecimento e de queda, etc. ou da redução de pressão causada pelo traçado das obras como, entre outros, os sifões e os contornos divergentes. Também, os problemas podem ser devidos aos perfis de vertedores mal projetados ou por inadequada colocação das comportas de regulação das descargas.

Abbasoglu e Okay (1992) citam o caso de cavitação no vertedor da barragem de Keban, em que foram adotadas soluções temporárias, como a substituição do concreto erodido, esmerilhamento das juntas transversais e ressaltos de tal maneira a suavizá-los. Também, foi dada especial atenção à operação da estrutura vertedora. Nesse caso, pôde-se obrigar a operação do reservatório em um nível mais baixo, de forma que se evitaram vazões significativas pelo vertedor, as quais poderiam incorrer no surgimento da cavitação. Na medida em que a vazão pelo vertedor aumenta, o dano devido à cavitação e os custos dos reparos, também aumentam. Os

trabalhos de reparos levaram aproximadamente um ano para sua execução, desde a demolição com equipamentos especiais, para se evitar choques e vibrações no material circundante, que não apresentava danos.

Em muitos casos, o dano é tão grande que reduz a vida útil da obra além de obrigar a longos períodos de interrupção de funcionamento. De acordo com Dalfré Filho, Genovez e Paulon (2000) as UHEs de Ilha Solteira, Marimbondo e Porto Colômbia sofreram interrupção de funcionamento devido ao aparecimento da cavitação. Falvey (1990) relata o caso do túnel de descarga de Yellowtail, onde foram detectadas erosões de cavitação de 2,1 m de profundidade, 14,0 m de comprimento e 5,9 m de largura.

A escolha adequada de um vertedor 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).

Quando aparece o dano na estrutura provocado pela cavitação, a área danificada resulta ser maior que a própria irregularidade que a causou, transformando-se em uma nova fonte de cavitação, continuando o processo e produzindo danos de maior tamanho. No caso de aparecimento de uma grande área erodida, o mecanismo que a provoca é a erosão de um jato de água a alta velocidade. Danos podem se desenvolver muito rapidamente, depois de iniciado o processo. A sua magnitude depende do número de horas de operação da estrutura e do índice de cavitação.

Simplesmente substituir o concreto erodido pode assegurar o uso imediato da estrutura, porém, não garante de forma alguma, um bom desempenho por longo prazo. Portanto, trabalhos de reparo incluem a substituição daquele concreto por outros, mais resistentes, com características especiais e, também, tratamento adequado das superfícies. Modificar o projeto, a operação da estrutura ou adotar as soluções em conjunto podem eliminar os mecanismos de danos. Em muitos casos, os materiais são utilizados para fazer reparos na estrutura, sem os

ensaios de laboratório necessários para testar sua aplicabilidade, como no levantamento de Dalfré Filho, Genovez e Paulon (2000). Percebe-se desde logo que, esses processos podem ser onerosos e necessitam de estudos prévios para sua aplicação, seja na fase de projetos como para os reparos.

Dadas às características do fenômeno da cavitação, somente através de estudos experimentais poderá se avaliar o desgaste provocado, assim como investigar parâmetros de correlação entre a severidade da erosão por cavitação e as condições do escoamento, especialmente no que diz respeito à distribuição de pressões. No caso das estruturas hidráulicas o problema é complexo, pois se verifica o efeito simultâneo do fenômeno da cavitação e do impacto de um jato de alta velocidade.

Desta forma, a avaliação da resistência ao desgaste de concreto nas estruturas hidráulicas é essencial para garantir a operação adequada da obra. Consta-se, há algumas décadas, a necessidade de se desenvolverem ensaios rápidos, eficientes e econômicos. Atualmente, a tecnologia disponível permite medir parâmetros de ensaios com rapidez e precisão. Contudo, para a avaliação do desgaste por cavitação, não existe um equipamento padronizado nem norma de ensaios. Surge, então, a necessidade de desenvolver um equipamento e um procedimento de testes que ofereça as vantagens apresentadas.

1.2 ORDENAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2, são apresentados os objetivos do trabalho. Na seqüência, no capítulo 3, faz-se a descrição do fenômeno da cavitação, assim como dos parâmetros envolvidos no seu desenvolvimento. No capítulo 4, apresenta-se a revisão bibliográfica dos equipamentos existentes, que visam simular o efeito erosivo da cavitação ou do impacto de um jato d'água. No capítulo 5, descreve-se a bancada de ensaios construída no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos para o desenvolvimento dos testes. No capítulo 6, apresentam-se os resultados obtidos, bem como a análise dos mesmos. Finalmente, no capítulo 7, é feita a conclusão do trabalho.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um equipamento tipo jato cavitante para avaliar o desgaste ocasionado pela cavitação em amostras de concreto empregados em estruturas hidráulicas. A instalação permitirá variar os parâmetros de ensaio, de forma a obter a máxima eficiência e definir o comportamento da amostra e o tempo de ensaio requerido.

3 CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DA CAVITAÇÃO

Neste capítulo será apresentada a caracterização do fenômeno da cavitação, considerando as principais variáveis atuantes. Ademais, apresenta-se o papel dos núcleos nos escoamentos e as fontes geradoras de baixas pressões que podem levar ao desenvolvimento do fenômeno. Um tratamento analítico para o fenômeno da cavitação pode ser verificado no trabalho de Dalfré Filho (2002)

3.1 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO

A cavitação consiste na rápida vaporização e condensação do líquido. O processo pode ser considerado análogo ao da ebulição, de acordo com Tullis (1989). No caso da ebulição, cavidades de vapor são formadas elevando-se a temperatura do líquido à pressão constante. Quando a água é aquecida, o aumento da temperatura resulta no aumento da pressão de vapor. Quando o valor da pressão de vapor se iguala ao valor da pressão atmosférica local, ocorre o fenômeno. No ponto de ebulição, água é transformada em vapor d'água. Esta mudança ocorre, primeiramente, em pontos localizados, no líquido e pode ser observado como pequenas bolhas. As cavidades de vapor formadas ascendem até a superfície do líquido. As cavidades expandem, à medida que ascendem, devido à pressão que decresce. Na superfície explodem, soltando o vapor para a atmosfera.

A temperatura em que a ebulição ocorre é função da pressão. À medida que a pressão diminui, a ebulição ocorrerá a temperaturas cada vez menores. Como a pressão é função da elevação, o fenômeno ocorre a temperaturas menores às maiores altitudes, como se observa na Figura 3.1. Se fosse possível alcançar altitude suficientemente elevada, a ebulição se daria à temperatura ambiente.

A cavitação, por outro lado, ocorre quando a pressão em um líquido, à temperatura constante, decresce à pressão de vapor (observar Figura 3.1) e, desde que haja núcleos (bolhas de ar ou vazios) no líquido, cavidades de vapor são formadas. A queda de pressão pode ser ocasionada por turbulência ou vorticidade no escoamento. Se a pressão no fluido permanecer no valor da pressão de vapor e as cavidades atingirem um diâmetro crítico, estas continuarão a crescer rapidamente. Porém, se a pressão aumentar a um valor maior que a pressão de vapor, as bolhas tornam-se instáveis e colapsam. O colapso pode ser violento e acompanhado de ruído, vibração e possível erosão das superfícies.

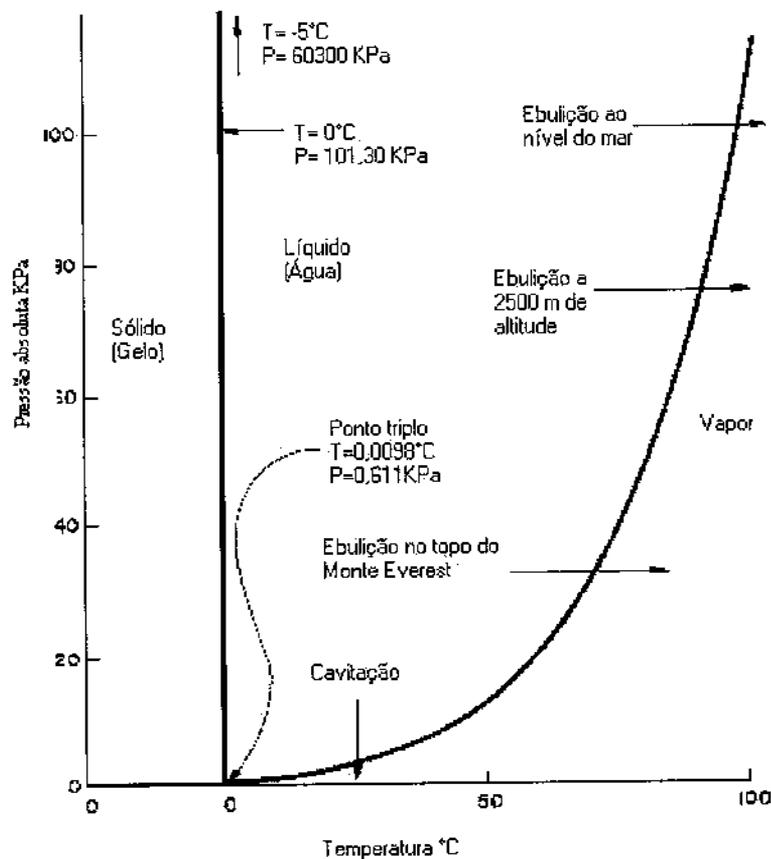


Figura 3.1. Diagrama de fases da água.

Fonte - Falvey (1990).

A cavitação pode ser classificada em dois tipos, de acordo com Tullis (1989), cavitação gasosa e vaporosa. A cavitação gasosa ocorre quando há quantidade considerável de ar incorporado ao líquido ou quando o processo de formação da cavitação é lento o suficiente para

que a quantidade de ar dentro da cavidade aumente. A taxa de crescimento e colapso é, então, menor. Assim, o processo não é tão violento ou danoso. Um exemplo de cavitação gasosa, em que a pressão de vapor nunca foi alcançada, é a de abertura de uma garrafa que contenha líquido carbonatado. Quando a garrafa ainda está tampada, há pressão suficiente para manter o dióxido de carbono em solução. Porém, ao destampá-la, a pressão é reduzida e o líquido torna-se supersaturado do dióxido de carbono e, assim, inicia-se a sua dispersão.

Por outro lado, se há pouco ar incorporado ao líquido, de tal maneira que as cavidades sejam preenchidas exclusivamente por vapor, a taxa de crescimento e colapso das bolhas é muito grande e pode causar danos severos ao contorno. No caso de um núcleo deste tipo ser transportado para uma região de baixa pressão, o raio de curvatura da superfície 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 mesmo. O rápido crescimento que se verifica, então, só será possível através da vaporização do líquido na interface ocorrendo, portanto, o processo de cavitação vaporosa. Este tipo de cavitação é a de interesse para o engenheiro.

Na Figura 3.2 o lugar geométrico dos raios críticos para os diversos valores de massa de gás no núcleo, está representado pela linha tracejada. No caso da cavitação gasosa, um núcleo com grande quantidade de gás ao ser transportado para uma região de baixa pressão poderá sofrer uma expansão contínua sem, contudo, atingir o raio crítico. Nesta situação, o crescimento do núcleo é devido principalmente à expansão do gás. Finalmente, cabe observar que a pressão crítica, para o crescimento explosivo do núcleo se situa em torno do valor da pressão de vapor do líquido, conforme mostra a Figura 3.2.

3.2 PARÂMETRO DE CAVITAÇÃO

As principais variáveis que influenciam o início e a subsequente característica da cavitação em um escoamento são a geometria da superfície, as variáveis referentes ao escoamento, pressão e velocidade e a pressão crítica à qual uma bolha pode ser formada ou a cavidade conservada. Outras variáveis podem influenciar significativamente esses parâmetros, como as propriedades do líquido (viscosidade, tensão superficial, e ponto de vapor), a existência

de contaminantes sólidos ou gasosos, e as características da superfície em contato com o líquido como a rugosidade ou presença de discontinuidades que possam abrigar gases não dissolvidos. Finalmente, as dimensões da superfície são importantes, não apenas afetando as dimensões das cavidades bem como influenciando características do escoamento. O parâmetro de cavitação não inclui todos esses efeitos. Utiliza-se, na verdade, um índice básico a partir das condições elementares de similaridade e indicam-se as outras variáveis como desvios do cálculo do parâmetro básico.

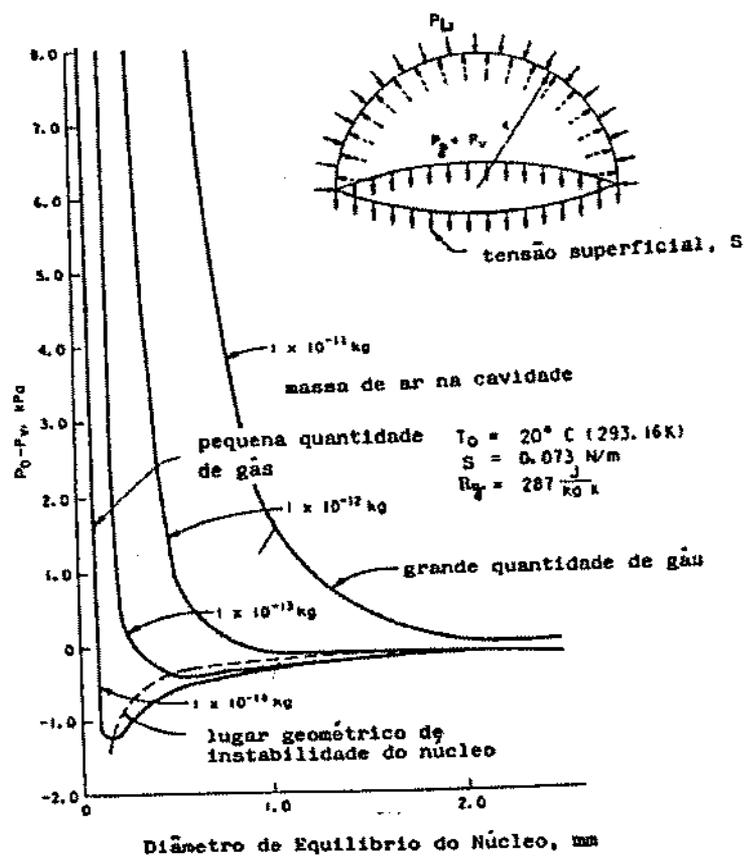


Figura 3.2. Condições de equilíbrio para cavidades de vapor.
 Fonte - Daily e Johnson (1957) citados por Falvey (1990).

Considere-se um líquido com valores constantes de suas propriedades físicas. O escoamento relativo entre um objeto imerso e o líquido que o circunda resulta em variações de pressão ao longo da superfície do mesmo. A variação de trabalho das forças de pressão é

proporcional a das forças de inércia. Pode-se escrever essa situação considerando o coeficiente de pressão (C_p), apresentado na Equação (3.1). O coeficiente de pressão, assim definido, é a relação entre a variação de pressão produzida e a energia cinética disponível.

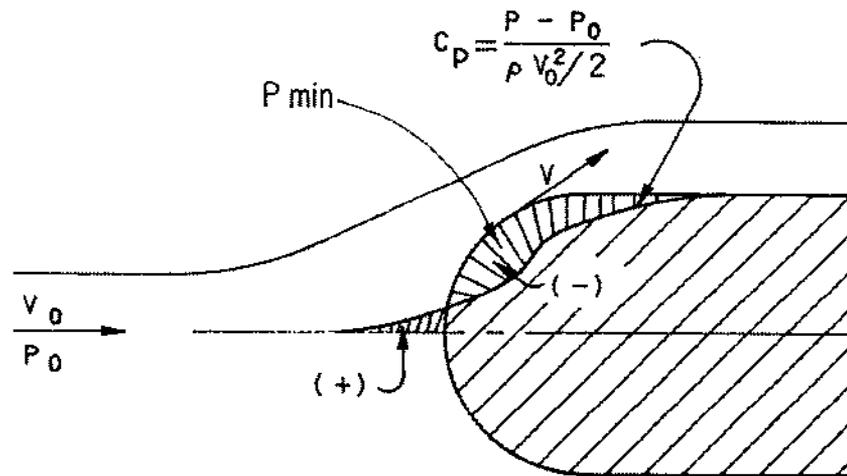


Figura 3.3. Distribuição de pressões em um corpo hemisférico submerso.
Fonte - Falvey (1990).

$$C_p = \frac{(p - p_o)_d}{\rho v_o^2 / 2}, \text{ sendo} \quad (3.1)$$

ρ : massa específica;

v_o : velocidade de referência;

p_o : pressão de referência;

p : pressão em um ponto do objeto submerso;

$(p-p_o)_d$: pressão diferencial devida aos efeitos dinâmicos do líquido em movimento.

Em um ponto do corpo, a pressão p será mínima (observar Figura 3.3), ou seja, igual a p_{\min} , de tal maneira que o coeficiente de pressão será mínimo:

$$(C_p)_{\min} = \frac{p_{\min} - p_o}{\rho v_o^2 / 2} \quad (3.2)$$

Na ausência de cavitação (e se os efeitos do atrito são negligenciados), este valor dependerá apenas da forma do objeto. Pode-se criar um grupo de condições em que p_{\min} decresça a um valor que surja cavitação. Então, a pressão neste ponto não mais decrescerá. Isto é conseguido elevando-se o valor da velocidade v_o para um valor fixo da pressão p_o ou continuamente abaixando p_o com v_o mantida constante. Um ou outro procedimento vai resultar no abaixamento dos valores absolutos de todas as pressões locais na superfície do objeto. As condições a montante que correspondem ao início da cavitação podem ser calculadas substituindo-se a pressão mínima na Equação (3.2). Se a tensão superficial for ignorada, a pressão p_{\min} será a pressão dentro da cavidade. Chamando a esta pressão, de pressão da bolha p_b pode-se definir um parâmetro de cavitação (σ) substituindo-se p_{\min} , como na Equação (3.3):

$$\sigma = \frac{p_o - p_b}{\rho v_o^2 / 2} = -(C_p)_{\min} \quad (3.3)$$

Ou, ainda, em termos de carga (em m.c.a.):

$$\sigma = \frac{(p_o - p_b) / \gamma}{v_o^2 / 2g}, \text{ sendo:} \quad (3.4)$$

p_o : pressão absoluta em algum ponto do líquido;

v_o : velocidade relativa;

p_b : pressão absoluta da cavidade ou bolha;

γ : peso específico do líquido.

Considera-se que a cavitação ocorrerá quando p_b assumir o valor da pressão de vapor p_v . Assim, reescreve-se a Equação (3.3) e chama-se o índice de cavitação por σ , obtendo-se a Equação (3.5):

$$\sigma = \frac{p_o - p_v}{\rho v_o^2 / 2} \quad (3.5)$$

O valor de σ para o qual inicia-se a cavitação é σ_i (índice de cavitação incipiente). O valor teórico de σ_i é o da magnitude de $|-(C_p)_{\min}|$ para qualquer corpo. Deve-se salientar que o parâmetro σ não é uma medida completa de similaridade dinâmica.

O início da cavitação significa o surgimento de cavidades no local ou próximo do objeto onde a pressão mínima é alcançada. Um aumento contínuo de v_o (ou decréscimo de p_o) significa que a pressão em outros pontos ao longo da superfície do objeto alcançará o valor da pressão crítica. Então a zona de cavitação alonga-se a partir do local original. Considerando-se o comportamento do índice de cavitação durante este processo e, novamente, desprezando-se os efeitos do número de Reynolds, o coeficiente de pressão $|-(C_p)_{\min}|$ dependerá somente da forma do objeto. Após o início do fenômeno, o valor diminui já que p_{\min} torna-se o valor da pressão da cavidade que tende a permanecer constante, independente se v_o aumenta ou p_o diminui. Então o parâmetro de cavitação adquire um valor definitivo a cada estágio de desenvolvimento ou “grau” de cavitação em um corpo em particular. Para início $\sigma = \sigma_i$, para estágios mais avançados de cavitação $\sigma < \sigma_i$. Valores de σ e σ_i dependem da forma do objeto imerso pelo qual o líquido escoar.

O objeto imerso pode ser uma superfície do escoamento, como a garganta de um Venturi, ou um corpo imerso no escoamento propriamente dito. Deve-se notar aqui para o escoamento ao redor de corpos imersos e superfícies curvas que σ_i será sempre finito. Para o caso de escoamento com paralelismo dos filetes de um fluido ideal, σ_i será nulo.

O parâmetro σ pode ser usado para relacionar as condições de escoamento e a possibilidade de ocorrência da cavitação, assim como o grau de estágios mais avançados. Para qualquer sistema em que as pressões p_b ou p_v sejam fixas, σ_b ou σ podem ser estabelecidos para um grande intervalo de valores de velocidade de referência v_o e pressão de referência p_o . Também, para qualquer grau de cavitação desde o início até estágios mais avançados, o índice tem um valor característico. Ajustando-se as variáveis do escoamento de tal maneira que σ seja maior, igual ou menor que σ_i , todas as possibilidades, desde não aparecimento da cavitação a estágios mais avançados podem ser estabelecidos.

Uma interpretação física do índice pode ser obtida a partir do exemplo que segue. Considere-se uma cavidade que está sendo formada e transportada de uma região de baixa para alta pressão. O numerador do índice é relacionado à pressão ou carga líquida que tende a colapsar a cavidade. O denominador é a velocidade relativa ou carga do escoamento. As variações de pressão na superfície do corpo ou em qualquer outro local de passagem do escoamento devem-se às mudanças de velocidade do escoamento. A carga cinética pode ser considerada à medida da redução da pressão que pode causar ou formar o aparecimento de uma cavidade ou sua expansão. Assim, o índice de cavitação torna-se a razão entre a pressão disponível para colapsar uma cavidade e a pressão disponível para induzir a formação e crescimento da cavidade. Este parâmetro é de grande utilidade como medida para diferentes aspectos do fenômeno da cavitação. Por exemplo, σ pode ser usado para designar a resistência relativa de uma determinada forma de hidrofólio, bem como designar um equipamento hidráulico inteiro. Isto é feito associando-se o objeto a um valor do índice de cavitação medido. Quanto menor esse valor, maior pode ser a queda de pressão antes de se iniciar o fenômeno e, por conseqüência, menor a probabilidade de ocorrência da cavitação.

A importância básica do índice de cavitação é a premissa de que existe um índice de similaridade dinâmica de condições do escoamento sobre as quais a cavitação se inicia, porém contendo algumas limitações. A similaridade dinâmica entre os escoamentos de dois sistemas requer que os efeitos de todas as condições físicas sejam reproduzidos de acordo com relações únicas. Assim, mesmo que propriedades termodinâmicas, propriedades químicas e idêntica geometria da superfície sejam adotadas, a similaridade dinâmica requer que os efeitos de viscosidade, gravidade, e tensão superficial tenham certo valor numérico. Ou seja, uma condição particular de cavitação só é alcançada para determinados valores do número de Reynolds, do número de Froude, do número de Weber e do índice de cavitação.

No caso da simulação do desenvolvimento da cavitação, utilizando o equipamento tipo jato cavitante, verifica-se a necessidade de um bocal especialmente projetado para este fim. O escoamento, próximo à saída do bocal, é restringido pelas paredes do mesmo. Existe, de acordo com White (2002), uma região de entrada em que um escoamento quase não viscoso a montante converge para um tubo e nele, adentra. As camadas-limite viscosas crescem na direção de jusante

e, portanto, aceleram o escoamento na região central para manter o requisito de continuidade em um fluido incompressível. Assim, além do índice de cavitação (ou número de Thoma), σ , definido no item 3.1 e representado na Equação (3.5), deve-se conhecer o valor do número de Mach, M_a , dos ensaios. O número de Mach está representado na Equação (3.6).

$$M_a = \frac{v_o}{c}, \text{ sendo} \quad (3.6)$$

v_o : velocidade no centro do jato;

c : celeridade.

A análise dimensional mostra que o número de Reynolds, \mathfrak{R}_D , representado na Equação (3.7) é o único fator que afeta o comprimento de entrada da camada limite (L_e).

$$\mathfrak{R}_D = \frac{v_o D}{\nu}, \text{ sendo:} \quad (3.7)$$

D : diâmetro do orifício;

ν : viscosidade cinemática da água.

O comprimento de entrada da camada limite (L_e), em um bocal, depende do diâmetro D , da velocidade do jato v_o e da viscosidade cinemática da água ν , ou seja:

$$L_e = f(D, v_o, \nu) \quad (3.8)$$

Desta forma, da análise dimensional tem-se:

$$\frac{L_e}{D} = g\left(\frac{v_o D}{\nu}\right) = g(\mathfrak{R}_D) \quad (3.9)$$

Para o escoamento laminar, a correlação aceita pode ser representada como em (3.10):

$$\frac{L_e}{D} \approx 0,06\mathcal{R}_D \quad (3.10)$$

Considerando-se o valor de $\mathcal{R}_D = 2300$, obtém-se $L_e = 138D$, que é o maior comprimento de desenvolvimento da camada limite laminar possível.

No escoamento turbulento, as camadas limite crescem mais rapidamente e L_e é relativamente menor, sendo representado pela Equação (3.11).

$$\frac{L_e}{D} \approx 4,4(\mathcal{R}_D)^{1/6} \quad (3.11)$$

Assim, para regime turbulento, pode-se estabelecer um intervalo de relações de L_e/D variando desde 18 até 95, aproximadamente. Chadwick e Morfett (1999) citam como valores práticos de comprimento de entrada, $L_e \approx 110D$ para regime laminar e $L_e \approx 50D$, para regime turbulento. Logo, pode-se estimar o nível de turbulência na saída do orifício, comparando-se a rugosidade do bocal e a espessura da camada limite laminar, a partir do comprimento de entrada (L_e).

De maneira complementar, deve-se verificar o efeito da tensão superficial nos ensaios com o equipamento tipo jato cavitante, utilizando-se, para tanto, do número de Weber, W_e , representado na Equação (3.12).

$$W_e = \frac{v_o^2 D \rho}{\sigma_{\text{sup}}}, \text{ sendo} \quad (3.7)$$

σ_{sup} : tensão superficial da água.

3.3 O PAPEL DOS NÚCLEOS

O termo núcleo é apenas outra expressão para bolhas de gás ou vazios no líquido. Para que o fenômeno de ebulição ou da cavitação ocorra é necessário a presença de núcleos no líquido.

Se fosse completamente extraído o ar de um líquido e este estivesse completamente limpo, de tal maneira que não houvesse contaminantes, vazios ou ar incorporado, o líquido poderia suportar tensão e não sofreria ebulição às temperaturas usuais ou não sofreria cavitação caso a pressão reduzisse até à pressão de vapor. Assim, a existência de núcleos é essencial para ocorrer a cavitação.

A quantidade e o tamanho dos núcleos dependem da origem do líquido. Água normalmente contém núcleos e contaminantes em quantidade suficiente para que o líquido cavite se a pressão atingir a pressão de vapor. Somente em condições de laboratório controladas os núcleos podem ser reduzidos a uma quantidade em que a cavitação seja suprimida. Caso a água seja recirculada por um túnel de água ou uma bomba, o aspecto dos núcleos e a quantidade de ar dissolvida são artificialmente alteradas e as condições para ocorrência do fenômeno, igualmente alteradas.

Tullis (1989) observa, ainda, que a água retirada de um nível mais baixo de um reservatório muito profundo pode apresentar baixo conteúdo de ar e núcleos. Isto torna ensaios de laboratório, conservadores. Por outro lado, se a água for supersaturada, intencionalmente ou não, o fenômeno da cavitação ocorrerá de maneira atenuada, sendo considerado do tipo gasoso e menos prejudicial ao sistema.

3.4 FONTES DE BAIXA PRESSÃO

A pressão local é a somatória da pressão média, que é uniforme em uma certa região do escoamento e da pressão dinâmica, que depende da velocidade do escoamento e, sobretudo, da formação e dissipação de redemoinhos ou vórtices em zonas de separação turbulentas. A pressão média em um sistema varia devido a mudanças de elevação, perdas de carga locais e distribuídas, assim como acelerações locais devido a mudanças nas seções do escoamento, conforme Tullis (1989).

Pressões geradas por turbulência ou pela formação e destruição dos redemoinhos são parte importante do processo de formação da cavitação. Esta flutuação de pressão dependente do tempo é o motivo pelo qual a cavitação é difícil de prever e se apóia basicamente em dados

experimentais. Pressões médias são obtidas a partir da aplicação da equação de energia e estimando-se corretamente as perdas do sistema. Porém, as pressões nas regiões de separação, redemoinhos ou turbulência são normalmente estimadas a partir de dados empíricos.

O papel desempenhado pelos redemoinhos ou turbulência na ocorrência de cavitação pode ser verificado para o caso de um jato submerso, conforme se verifica na Figura 3.4. A velocidade na tubulação de aproximação do orifício é relativamente baixa e a pressão relativamente alta. Ao aproximar-se ao orifício a velocidade aumenta e a pressão diminui. Quando o jato deixa o orifício, uma intensa camada de cisalhamento é criada ao longo da região de separação do jato e a vizinhança. Os gradientes de velocidade nesta região criam redemoinhos como se vê na Figura 3.4. A pressão média na região de separação próxima ao jato é aproximadamente a mesma dentro do jato. Entretanto, a pressão dentro dos redemoinhos é significativamente menor devido às altas velocidades rotacionais. Se um núcleo é capturado em um desses redemoinhos, e a pressão dentro dele atinge a pressão de vapor, o núcleo expande-se. Se a pressão mantiver-se próxima à pressão de vapor por um período suficiente para que o núcleo alcance um diâmetro crítico, a cavidade torna-se explosiva pela vaporização. À medida que o tamanho da cavidade de vapor aumenta, a resistência do redemoinho diminui, a velocidade rotacional diminui e a pressão circundante à bolha não é mais a pressão de vapor. Como a pressão ambiente está acima da pressão de vapor e, internamente, a pressão é a de vapor, a cavidade torna-se instável e colapsa internamente.

Pode-se comparar o potencial de cavitação entre um Venturi e um jato submerso. Considere-se que ambos estejam instalados em uma tubulação de mesmo diâmetro e, ainda, que o diâmetro da garganta do Venturi seja o mesmo do jato contraído do jato submerso. Se ambos operam à mesma pressão de montante e vazão, o jato submerso é muito mais suscetível ao surgimento da cavitação devido ao alto grau de turbulência gerada na camada de cisalhamento ao redor do jato. Portanto, conclui-se que a pressão local na região da cavitação deve ser maior que a pressão de vapor para haver a implosão das cavidades. Para o caso de um jato submerso a recuperação de pressão ocorre principalmente da destruição dos redemoinhos e o núcleo, então, está sujeito a pressão local, causando a sua instabilidade.

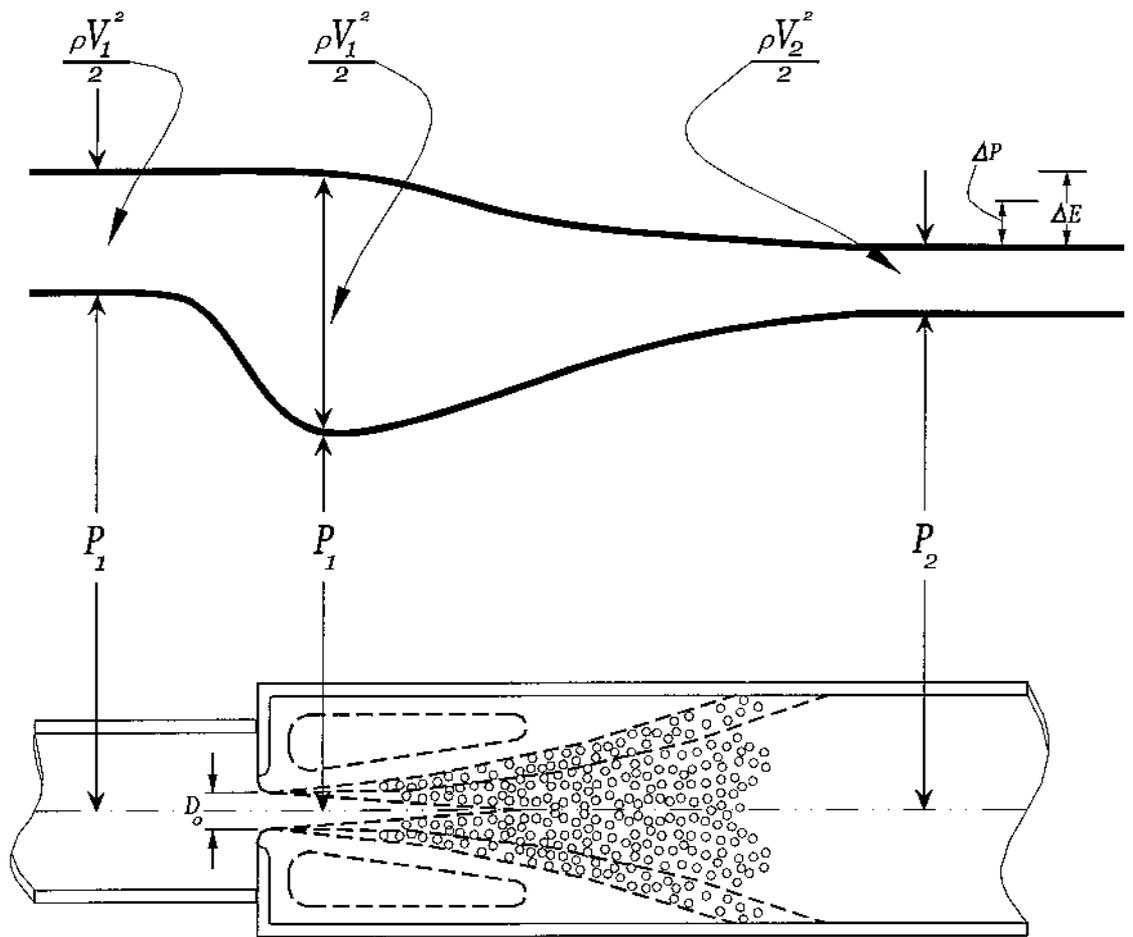


Figura 3.4. Padrão do escoamento para o caso de um jato submerso.

Fonte - Tullis (1989).

Usando-se uma lâmpada estroboscópica a fim de observar a cavitação que ocorre em um alargamento repentino, o fenômeno pode ser observado como lampejos rápidos, na região aonde são mostrados os redemoinhos na Figura 3.4.

3.5 LIMITES DE CAVITAÇÃO

De acordo com Lemos (1986) pode-se distinguir os seguintes limites de cavitação. A condição de cavitação incipiente (σ_i) representa o início da cavitação, embora não exista um ponto determinístico do processo. A intensidade é determinada por ruídos leves e intermitentes e não deve ser confundido com o ruído de fundo do escoamento. A condição de cavitação crítica

representa um nível mais elevado que o anterior. O ruído é estacionário, mas leve, não chegando a importunar quem esteja junto ao dispositivo em condições de cavitação. O terceiro estágio é o de cavitação com bloqueio que pode ser visualizado pelo esquema da Figura 3.5 para um orifício. À medida que a vazão através do orifício aumenta, a pressão média a jusante poder-se-á reduzir à pressão de vapor e ter-se a situação de bloqueio. Próximo deste ponto, a cavitação atinge sua capacidade máxima. A Linha 1 representa o gradiente hidráulico normal antes da situação de bloqueio. A pressão mínima ocorre na “vena contracta” e a pressão normal é, então, recuperada. A linha 2 representa a condição em que a taxa aumentou até que a pressão mínima na “vena contracta” decresceu até a pressão de vapor. Para o orifício, esta situação pode ser prevista pela Equação de Bernoulli, utilizando-se o coeficiente de contração. Quando isso ocorre, o orifício tem sua máxima vazão para uma dada pressão de montante, p_u (condição de bloqueio). Acima deste ponto, o coeficiente de descarga permanece constante e igual ao seu valor para a condição de não-cavitação. Se a pressão a jusante do orifício (p_d) é reduzida, a região cavitante alonga-se, mas o escoamento permanece constante. Se a pressão de jusante diminui e a vazão permanece constante, o coeficiente de descarga reduz (Linha 3). À medida que a pressão de jusante (p_d) reduz-se mais, eventualmente, as cavidades de vapor estendem-se além da pressão de jusante, de tal maneira que p_d assume o valor da pressão de vapor (Linha 4). Esta situação é referida, às vezes, como supercavitação.

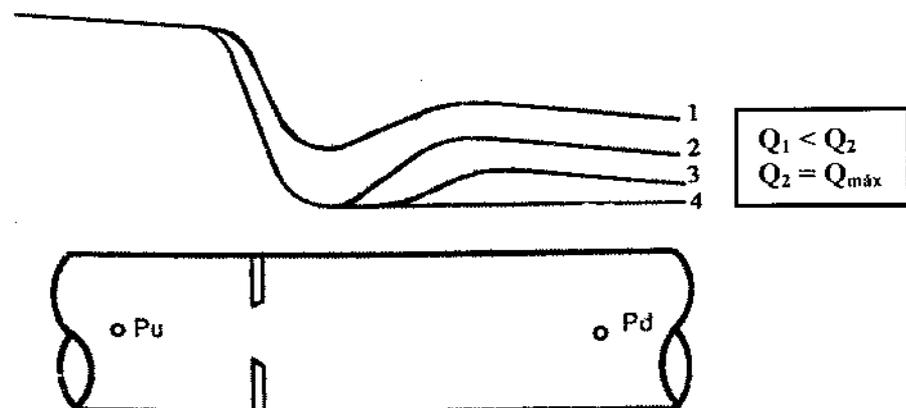


Figura 3.5. Linha de gradiente hidráulico para cavitação com bloqueio.

Fonte - Tullis (1989).

Se o tubo for constituído de algum material transparente, nesta situação poderia ser visualizado o que parece ser um jato em descarga livre. A diferença é que o jato é circundado de cavidades de vapor em vez de ar. Em algum ponto, mais a jusante, a pressão se normaliza e o tubo volta a escoar a seção plena. Um aspecto da condição de supercavitação é que o dano não ocorre no orifício. Entretanto, na região em que cessam as cavidades ocorrem danos severos. Ainda, segundo Lemos (1986) essas cavidades podem desaparecer com uma ligeira alteração da pressão a jusante, com deslocamento da zona de implosão para as proximidades do orifício, causando aí uma elevação transitória da pressão. Neste caso, o orifício está sujeito a danos por erosão.

3.6 COMENTÁRIOS

No que se refere ao desenvolvimento do fenômeno da cavitação, para se considerar os resultados de laboratório válidos para aplicação nas estruturas hidráulicas, é necessário a determinação de parâmetros de similaridade. No caso do emprego do equipamento tipo jato cavitante, deve-se calcular, além do índice de cavitação, os valores dos números de Reynolds, Weber e Mach, de forma a determinar a influência deles na condição de semelhança dinâmica. Além disso, singularidades próximas ao bocal, assim como as suas dimensões e asperezas, podem gerar turbulências localizadas que podem afetar o escoamento e, logo, devem ser conhecidas.

4 PRINCIPAIS PESQUISAS PARA SIMULAÇÃO DA CAVITAÇÃO EM LABORATÓRIO

Neste capítulo serão apresentadas as pesquisas efetuadas para a quantificação da erosão por cavitação. Em particular, para o caso da erosão de cavitação em concreto, o comportamento deste material com longa exposição ao fenômeno da cavitação têm sido objeto de estudos uma vez que esse material é usado em barragens, vertedores, canais e outras estruturas hidráulicas.

4.1 EQUIPAMENTOS EXISTENTES PARA A AVALIAÇÃO DA EROSÃO POR 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 30 m/s.

Leach e Walker (1966) comentam que quando rochas são cortadas nas minas de carvão por picaretas de aço, o calor do atrito pode causar explosão pela ignição do gás metano. Desta maneira, o estudo de corte, para as minas de carvão, por jatos de água de alta velocidade foram iniciados, evitando-se explosões. Um jato de água de alta velocidade emergindo de um bocal diminui sua velocidade conforme aumenta a distância do bocal ao alvo e se rompe em gotas de água. Estudos do comportamento de jatos de água foram feitos. Na maioria dos experimentos, os jatos foram produzidos por pressões de 60 MPa, mas alguns testes foram realizados para pressões de até 500 MPa. Para verificar o efeito do jato de água para o corte de rochas, os autores desenvolveram o equipamento visualizado na Figura 4.1.

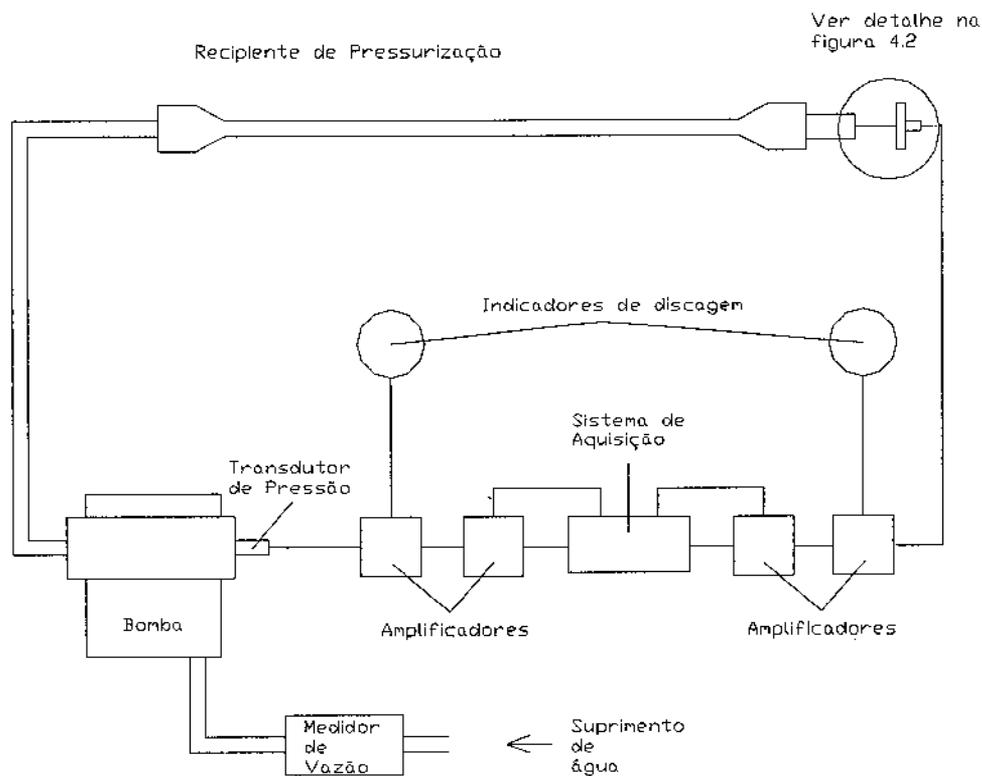


Figura 4.1. Equipamento utilizado por Leach e Walker (1966).

Um jato contínuo de água de alta velocidade é obtido a partir de uma bomba de pistão de 90 hp, com capacidade de vazão de 45 l/min a uma pressão de 60 MPa. Para reduzir a variação da pressão quando a bomba “pulsar”, um tranquilizador de fluxo de capacidade 65 l foi instalado em série com a bomba. Um transdutor foi usado para monitorar a pressão d’água a montante do bocal.

Para determinar a pressão de estagnação no eixo do jato em função da distância do bocal ao alvo e, também, para estudar a pressão na superfície do alvo, foi usado um bloco de liga aço-prata endurecido, com uma tomada de pressão de 0.3 mm de diâmetro e aproximadamente 2.5 mm de profundidade, atrás do qual foi fixado um transdutor de pressão, conforme se verifica na Figura 4.2. O anteparo de aço era movido por engrenagem, variando-se a distância até que a máxima pressão de impacto fosse registrada.

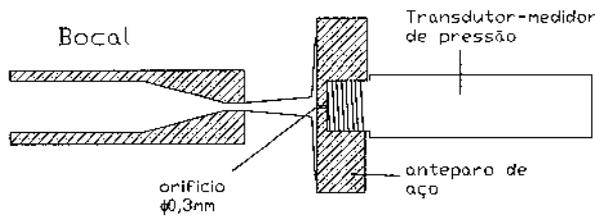


Figura 4.2. Esquema do jato incidindo sobre o anteparo durante os ensaios.

Dessa maneira, foram estudadas várias distâncias do jato ao alvo, para uma série de bocais de geometrias diferentes, uma vez que os autores afirmam que a geometria do bocal é importante na verificação da eficiência do desgaste. Os autores citam que o nível de turbulência na saída do bocal é afetado pela aspereza da parede interna e pela porcentagem de contração, ademais bocais de pequenos comprimentos são preferidos, de maneira a provocarem menor perda de carga. Os autores constataram que, na medida em que a distância do bocal ao anteparo (alvo) é aumentada, a pressão registrada no anteparo se tornava instável, o que sugere que o centro do jato não é contínuo. As flutuações de pressão observadas são provenientes do impacto de gotículas individuais provenientes do centro do jato, segundo os autores. Ainda, complementam que a pressão do “pulso” de água é superior à pressão “estável” para jatos com velocidade de cerca de 350 m/s. Os autores estudaram o comportamento dos bocais cujas geometrias são apresentadas na Figura 4.3.

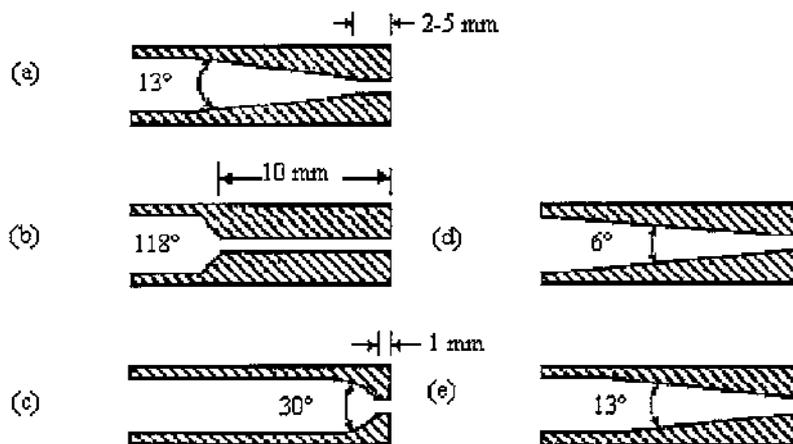


Figura 4.3. Corte esquemático dos bocais usados por Leach e Walker (1966).

Os melhores resultados foram obtidos para a geometria (a). O bocal (b) apresentou resultados ruins em comparação aos demais que, na opinião dos autores, é devido a maior extensão do trecho após a convergência (observar Figura 4.3), produzindo maiores perdas. Bons resultados foram dados pelo bocal (c), que resulta num jato com menor espalhamento, tendo sido utilizado na aplicação de combate a incêndios. Os bocais (d) e (e) são cônicos, sem uma seção reta final; os resultados obtidos com o bocal cônico de 13° (d) foram melhores que o de 6° (e), porém inferiores que os resultados do bocal (a). Foram, também, avaliados bocais confeccionados com 14 geometrias diferentes, todos com ângulos de abertura cônicos, seguidos por uma seção de 3 mm de comprimento. O diâmetro do orifício utilizado foi fixado em 1 mm; os ângulos de abertura do cone foram variados de 3° a 45° , com e sem arestas internas arredondadas. Os resultados mostram que os resultados com bocais cônicos maiores que 20° não foram tão satisfatórios quanto os de menor ângulo de abertura. Os bocais com arestas internas vivas são levemente melhores do que os bocais com as arestas internas arredondadas.

O efeito do comprimento final do bocal para uma contração de 13° com arestas vivas foi estudado pelos autores. Os melhores resultados são obtidos para uma seção reta de comprimento aproximadamente 3 mm. Os resultados obtidos para um comprimento 0 mm foram incertos, já que o final do bocal mostrou sinais de desgaste quando as medições acabaram.

Desses estudos, os autores concluíram que a pressão a montante do bocal pode ser aplicada a um anteparo a uma distancia até 100 vezes o diâmetro do bocal, sem grandes perdas. Para alguns bocais, a pressão a essa distancia foi mais de 80% da pressão disponível. Isso significaria que não seria necessário, numa aplicação prática, que um bocal estivesse próximo a superfície do alvo para que fossem provocados danos significativos pelo impacto. A geometria mais simples de bocal que possui o melhor desempenho é a de ângulos de aberturas do cone menores (6 a 20°) seguidos por uma seção reta com comprimento de 2 a 4 vezes o diâmetro do bocal.

Observa-se que os autores não se preocuparam com o efeito desgastante da cavitação nos ensaios, considerando que os resultados obtidos são provenientes do impacto do jato. Como o objetivo era provocar o corte de rochas, foram utilizadas nos ensaios, altíssima pressão (60 MPa)

e altíssima velocidade do jato (até 350 m/s). Pressões desta magnitude não podem ser usadas para o ensaio de desgaste de concreto, pois poderiam provocar o corte imediato do mesmo. Para o estudo do corte de rochas, utilizaram-se várias geometrias de bocais para indicar qual a melhor para aquela aplicação, contudo, os resultados obtidos não podem ser aplicados, sem estudo prévio, para o caso de se utilizar o efeito combinado do impacto do jato e da cavitação para erodir amostras, uma vez que as configurações são bastante diferentes.

Hobbs (1966) cita que existem dois tipos principais de testes de erosão por cavitação utilizados em laboratório. No primeiro, a cavitação é gerada por uma alta velocidade relativa do fluido. Esta pode ser obtida pelo escoamento através de um Venturi (ou outro tipo de tubulação com contração) ou, alternativamente, pela rotação de um disco perfurado totalmente submerso em água. Ambos os testes requerem uma grande quantidade de energia disponível para realizá-los e a taxa de erosão tende a ser baixa, particularmente, no tubo contraído. Também, o autor cita que testes de erosão devido ao impacto de uma gota foram desenvolvidos. Neste aparato, amostras são posicionadas próximas à borda de um rotor, o qual funciona a alta velocidade, de tal maneira que a amostra sofra erosão pelo impacto do jato que se forma. Material é removido da amostra, na maioria dos casos, em questão de minutos. Assim, a taxa de erosão em termos de perda de peso pode ser obtida rapidamente. Hobbs (1966) verificou, em laboratório, que a velocidade nos ensaios realizados possui uma influência considerável na taxa de danos. Os resultados de ensaios obtidos com impacto de jatos são, também, fortemente influenciados pelo diâmetro do jato. A taxa de erosão medida pela perda de peso ao longo do tempo aumentava à quinta potência para velocidades de impacto entre 100 m/s e 251 m/s. Também, o autor sugere que a taxa de erosão varia com o quadrado do diâmetro do jato.

Nota-se que o autor descreve três tipos de ensaios de laboratório que simulam a erosão por cavitação, contudo não há no artigo qualquer ilustração dos equipamentos ou algum detalhamento. Especialmente no que se refere ao último equipamento descrito, aonde a ação do impacto do jato, diminui sobremaneira os tempos dos testes, deveria ter sido apresentada uma ilustração para melhor compreensão do posicionamento da amostra com relação ao rotor de alta velocidade. Com relação às taxas de danos, verifica-se que esta aumenta rapidamente à medida que a velocidade no sistema aumenta. Tullis (1989) cita taxa de erosão variando com v^n , sendo o valor de n compreendido entre 4 e 7. Falvey (1990), por sua vez, considera n como sendo da

ordem 11 para materiais usados nas estruturas hidráulicas. Ou seja, os resultados verificados por Hobbs (1966) coincidem, aproximadamente, com os citados posteriormente por Tullis (1989). Tullis (1989) cita, ainda, que a taxa de erosão elevada a potência de 4 a 7 na velocidade sugere um limite conservador para a condição de danos incipientes, uma vez que um pequeno aumento na velocidade causa um grande aumento na taxa de erosão. Comparando-se os valores das taxas de erosão apresentadas pelos três autores, verifica-se que não se podem considerar àquelas da engenharia mecânica (n variando de 4 a 7) para as estruturas hidráulicas de concreto (n ao redor de 11).

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 4.4, 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 MPa. 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.

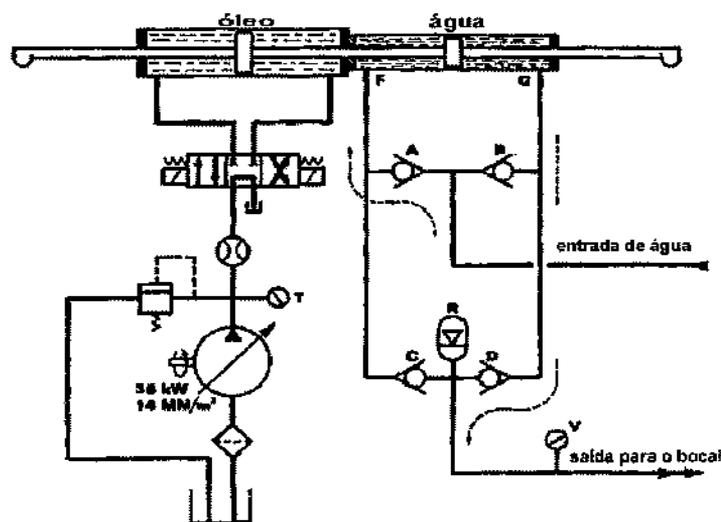


Figura 4.4. Esquema do aparelho desenvolvido por Houlston e Vickers (1978).

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 altas tensões na superfície da amostra. Porém, nem toda evidência experimental corrobora a idéia de que a erosão devida à cavitação de um jato fosse maior que uma obtida a uma distância maior (menos crítica), aonde 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 desses autores.

Os diagramas esquemáticos dos orifícios encontram-se na Figura 4.5. Cada tipo de bocal utilizado por Houlston e Vickers (1978) foram feitos nos diâmetros de 0,4 mm, 0,8 mm, 1,6 mm e 3,2 mm. Como resultado, esses 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°, enquanto que os bocais cônicos de 40° 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.

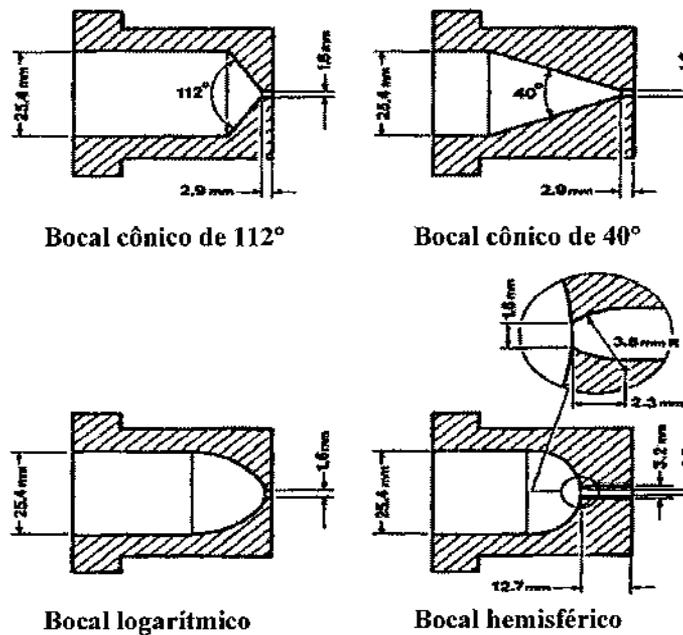


Figura 4.5. Bocais utilizados nos testes do aparelho de Houlston e Vickers (1978).

Pode-se observar que é possível atingir os mesmos resultados dos autores com equipamento de concepção mais simples e prática. Com relação aos bocais construídos e às pressões utilizadas para os ensaios, estão disponíveis detalhes dos mesmos, com exceção do bocal logarítmico, que apresentou um dos melhores desempenhos com relação à erosão de cavitação sendo, porém, impossível reproduzir com exatidão o ensaio dos autores para esse bocal. É apresentado equacionamento para verificar a eficiência dos bocais com relação ao dano causado pelo impacto e pela cavitação, além da observação experimental dos autores com relação a esses dois efeitos. A avaliação da eficiência é útil para poder comparar o desempenho dos mesmos e sugerir o melhor bocal a ser usado.

Lichtarowicz (1979) utilizou equipamento de ensaio no qual um jato submerso é utilizado para erodir uma amostra (Figura 4.6). 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 35 MPa. À medida que a diferença de pressão é aumentada, a região cavitante se estende em comprimento até que 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 do número de cavitação e do conteúdo de ar no líquido usado.

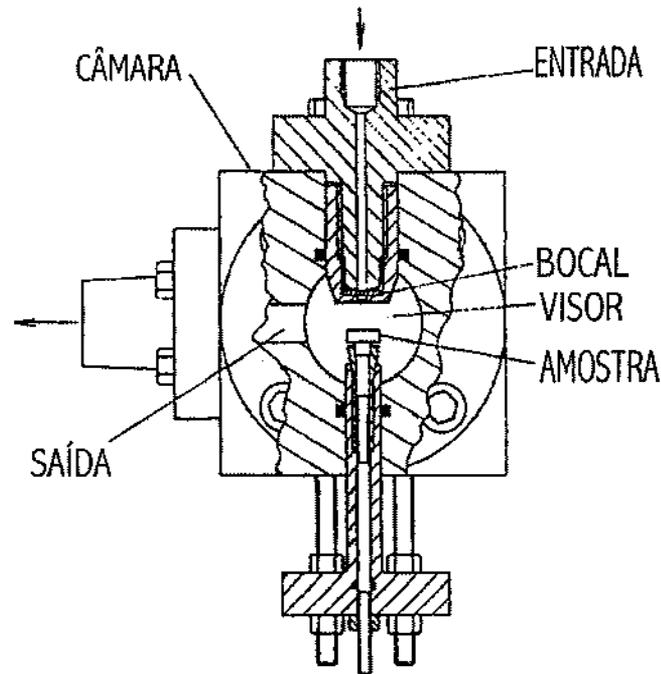


Figura 4.6. Detalhe do aparelho de Lichtarowicz (1979).

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 feitos suficientemente largos 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 descreve 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, à magnitude de velocidade que é da ordem de 100 m/s. O autor 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 se evitar problemas de escala.

Verifica-se que o autor cita que a aparência e o ruído do jato cavitante depende do valor do índice de cavitação e do conteúdo de ar dissolvido. Porém, a quantidade de ar dissolvida nos ensaios não foi verificada. O equipamento permite a obtenção de ensaios curtos devido às altas pressões, mas não foram fornecidos muitos detalhes da execução. As dimensões da câmara que contém a amostra a ser testada inviabilizam os testes com amostras de concreto, que não podem ter dimensões reduzidas, dados os tamanhos dos agregados e a heterogeneidade do material.

Gikas (1981) pesquisou os efeitos da cavitação sobre superfícies de resina epóxi e concretos comuns e especiais. No estudo fez 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 4.7 e 4.8. 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 m, Q: 100 l/s), passou-se para (H: 50 m, Q: 150 l/s), reduzindo o tempo de ensaio para ordem de 60 h. Para diminuir ainda mais o tempo de ensaio, o difusor Venturi foi modificado, passando o tempo de ensaio para a ordem de 30 h. 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.

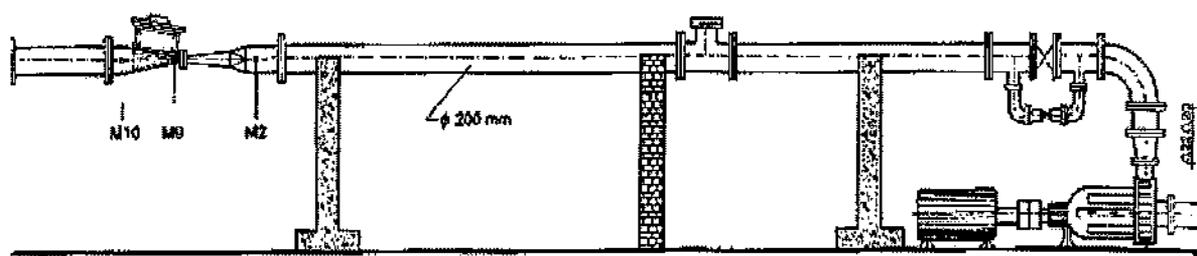


Figura 4.7. Instalação utilizada nos ensaios de cavitação de Gikas (1981).

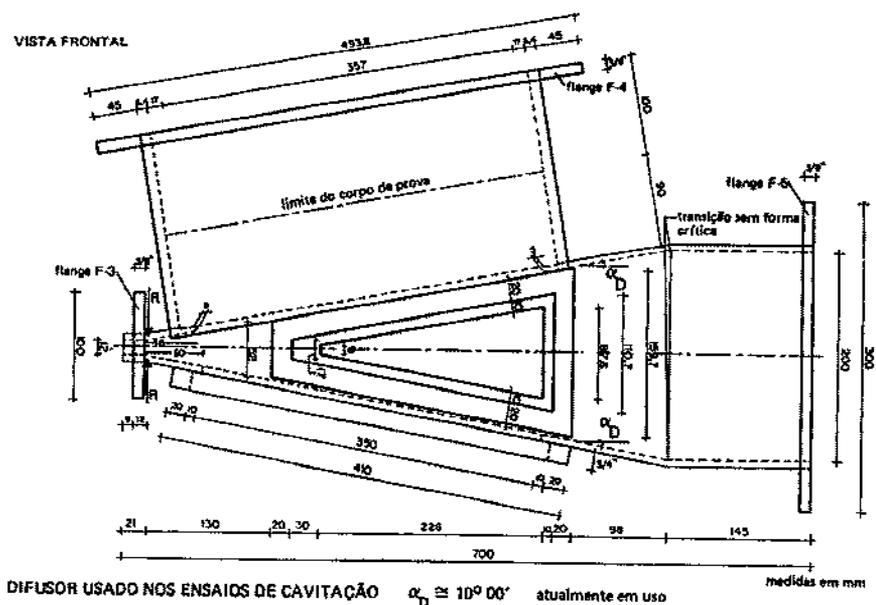


Figura 4.8. Detalhe do difusor utilizado na instalação de Gikas (1981).

Verifica-se que o autor realizou um extenso trabalho sobre a ação da cavitação em concretos. São apresentados detalhes do equipamento utilizado bem como dos procedimentos de ensaios. Contudo, características das amostras não foram publicadas devido a pedido de sigilo

pelo órgão requerente dos ensaios. O tempo dos ensaios é bastante longo, devido às velocidades mais baixas no difusor Venturi. A utilização de velocidades mais altas diminuiria os tempos de testes. Além disso, o equipamento requer grande espaço para toda a instalação.

Conn et al (1984) estudaram aplicações do jato cavitante para limpeza submersa de plataformas de concreto e corte de concreto. Também, verificaram a viabilidade de separar barras de aço do concreto, de forma a poder se reutilizar o aço, em vez de simplesmente inutilizá-lo devido à falta de precisão de um método de corte prático. Os autores desenvolveram um orifício para a condição de fluxo estável, que denominaram CAVIJET[®] (Figura 4.9). No CAVIJET[®] uma peça central interrompe o fluxo próximo à linha central do jato, focando-o e fornecendo condição de limpeza e corte mais intensos. Em seguida, o Quadro 4.1 fornece as especificações dos orifícios utilizados e as respectivas condições de ensaios.

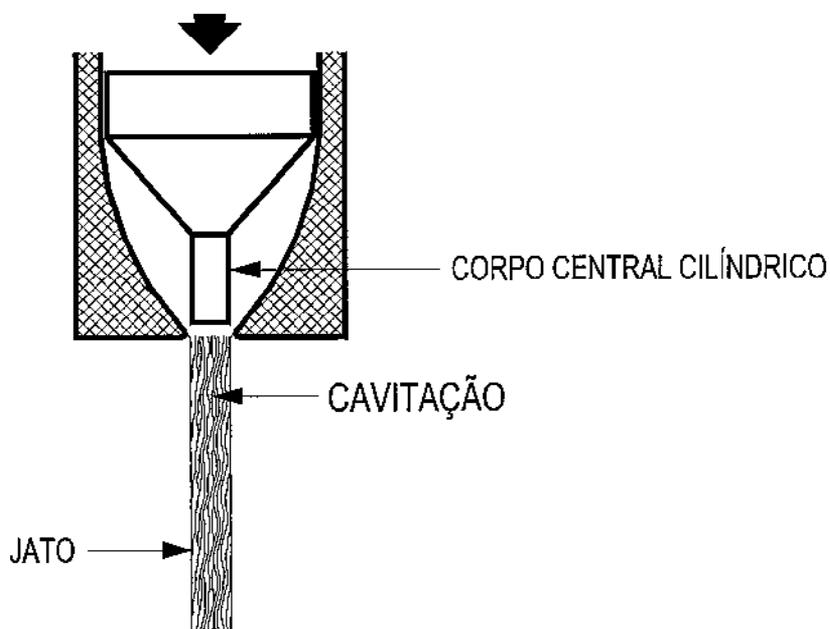


Figura 4.9. Detalhe do orifício CAVIJET[®], desenvolvido por Conn et al (1984).

Os autores apresentam aplicações alternativas para a utilização do equipamento tipo jato cavitante. São apresentados maiores dados com relação ao tipo de bocal utilizado e aplicações do que com relação ao equipamento empregado. Em todos os casos, a aplicação do jato cavitante era voltada para o corte de concreto ou para limpeza. O jato não foi empregado para avaliação de

desgaste de amostras, que requer combinação de velocidades e pressões específicas para este caso. Assim, não seria recomendado para normalizar ensaios de desgaste devido à cavitação em concretos.

Quadro 4.1. Especificações dos bocais e condições de ensaios.

| 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).

Amblard, Bonazzi e Lecoffre (1988) relatam que um grande número de equipamentos hidráulicos trabalha freqüentemente com altas velocidades de fluido. Pode-se citar o caso das turbinas de alta queda onde as velocidades relativas podem atingir de 35-70 m/s. Tais valores de velocidades podem levar ao aparecimento da cavitação nestes equipamentos. O estudo da cavitação em máquinas hidráulicas admite a semelhança entre os escoamentos do modelo e do protótipo. As condições modelo, segundo os autores, são uma combinação total ou parcial dos seguintes parâmetros: dimensões, material, velocidade, fluido. O objetivo dos autores foi verificar o efeito do ar dissolvido na erosão de cavitação. O método de ensaio consiste em posicionar amostras polidas em um equipamento que simula a erosão de cavitação, no caso um Venturi, durante um tempo relativamente curto. A agressividade da cavitação é evidenciada através da contagem dos danos na superfície da amostra, causada pela implosão das cavidades. Os ensaios foram realizados com três diferentes concentrações de oxigênio (0.1, 3.0 e 11.0 ppm, que correspondem a três pressões de saturação do gás), e três diferentes velocidades de escoamento (20, 30 e 50 m/s). Os autores verificaram através da contagem microscópica dos danos que concentrações da ordem de 0.1 a 11.0 ppm, não produzem variação notável de erosão de cavitação. Assim, os resultados de modelos de laboratório industrial podem ser aplicados aos casos reais.

Observa-se que os autores utilizaram o dispositivo Venturi para simulação de erosão de cavitação, em um tempo de ensaio relativamente curto, porém não indicam os valores desses tempos de ensaios. Contudo velocidades de ensaio de 50 m/s para simular erosão de cavitação em amostras metálicas, devem conduzir a tempos de ensaios mais longos, ainda mais se se deseja atingir a fase de erosão estável. Não são feitas análises dos efeitos de escala de diâmetro ou de pressão. Os valores de concentração de oxigênio não foram obtidos por medição direta, mas por fórmulas de previsão de concentração. Mais detalhes deveriam ser fornecidos sobre a validade destas formulações, através de resultados em laboratório e quais considerações dos efeitos escala deveriam ser levadas para aplicação dos resultados dos modelos nos casos reais. Também, não é evidenciado no texto qual o material usado como amostra, deduzindo-se apenas, ser um material metálico.

Avellan e Farhat (1988) comentam que a erosão por cavitação de máquinas hidráulicas é, principalmente, devido ao colapso dos vórtices cavitantes que são formados em uma zona de cisalhamento intensa. As instabilidades nesta região provocam o aparecimento periódico de filamentos turbilhonares em forma de “U”, movendo-se rapidamente e contorcendo-se, que são chamados pelos autores de “vórtice cavitante”. Assim, mesmo que as cavidades de vapor implodam longe da parede sólida, os vórtices implodem sobre a parede, causando erosões. Os autores utilizaram um gerador de vórtices cavitantes que permite produzir repetida e controladamente o colapso deste tipo de cavidade que podem se produzir nas máquinas hidráulicas. A câmara de ensaio é constituída de um disco em rotação por um motor de corrente contínua, em que a velocidade pode ser variada. Água é introduzida tangencialmente ao disco. No eixo do disco, dentro da câmara, é posicionada uma amostra, conectada ao disco por um tronco de cone de comprimento 40 mm que realiza uma mudança de seção circular para retangular, como na Figura 4.10. Através de uma câmara de alta velocidade (1 milhão de imagens por segundo) os autores observaram a formação dos vórtices. A evolução dos vórtices obtidos através da câmara rápida permitiu que os autores evidenciassem a formação de ondas de choque esféricas violentas no instante do colapso. Os autores não puderam observar as instabilidades das cavidades que resultassem em um micro-jato, no caso das cavidades esféricas. Porém, as subpressões estimadas entre 1 GPa e 2 GPa, permitem explicar que as ondas de choque por si só produzem danos em qualquer material industrial.

Nota-se que a câmara de ensaios não permite reproduzir, com confiança, os danos da cavitação em um material heterogêneo. Os autores consideram que toda a erosão é devido aos filamentos de vórtices, ou seja, desconsideram os mecanismos tradicionais de danos verificados na literatura como a formação de microjatos e os impactos de ondas de pressão. Ensaio adicionais deveriam ser realizados para corroborar as observações desses autores.

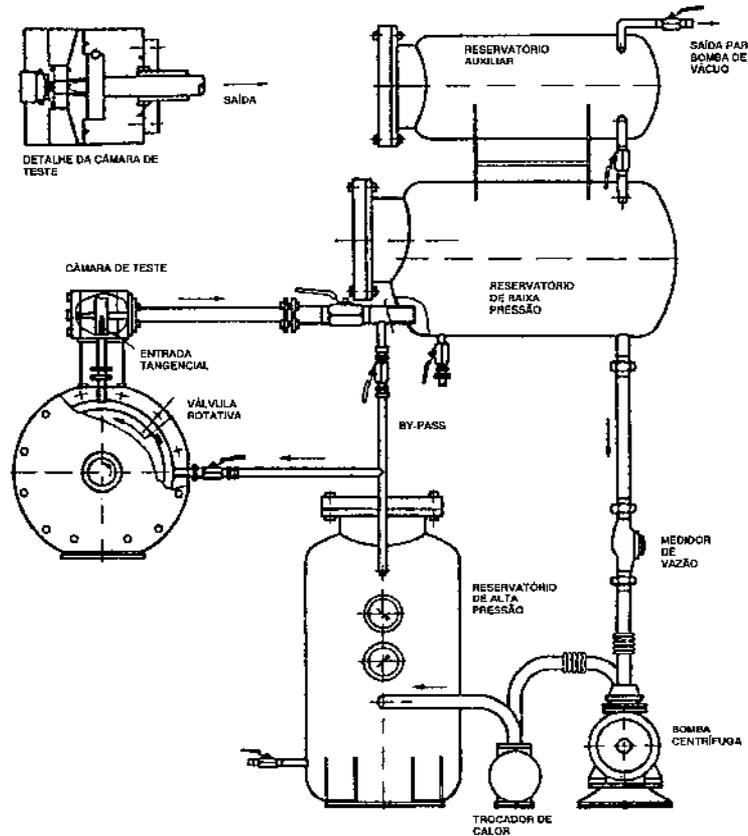


Figura 4.10. Esquema da bancada de ensaios de Avellan e Farhat (1988).

Bonazzi e Fournier (1988) comentam que a válvula de ajuste Monovar foi desenvolvida para se obter um dissipador de energia o mais silencioso possível, em um túnel de cavitação. Placas perfuradas são comumente utilizadas como dissipadoras de energia. A Monovar consiste de duas placas perfuradas idênticas que deslizam uma sobre a outra. A válvula está aberta se os orifícios coincidem e, ao contrário, se fechada. O dispositivo tem boa performance, pois nenhuma perturbação de baixa frequência é criada e o sistema não é suscetível ao aparecimento da

cavitação, mesmo se trabalhando com baixo valor de σ . O desempenho da Monovar é comparado com o da válvula borboleta no que diz respeito à formação e intensidade da cavitação.

Nota-se que o trabalho dos autores não tem objetivo de simular erosão de cavitação em amostras. O circuito montado para análise de funcionamento da Monovar não permite a verificação do efeito erosivo em amostras.

Observa-se que os trabalhos de Amblard, Bonazzi e Lecoffre (1988), Avellan e Farhat (1988) e Bonazzi e Fournier (1988) utilizaram o desenvolvimento do fenômeno da cavitação com o fim de emprego na área mecânica. Quando amostras eram testadas, as mesmas eram metálicas. Os tipos de equipamentos propostos não são adaptáveis para avaliação do comportamento de concretos.

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 137 m, e vazão de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, numa tubulação de diâmetro de 0,3 m, produzindo velocidade de 32 m/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 14,5 MPa, com um motor de 5 hp 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 0,051 m 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 epóxi, de forma a verificar a adesividade entre os materiais, comparando amostras que sofreram tratamento de irradiação com raios γ , com outras sem o mesmo tratamento. Também, realizaram ensaios dessas amostras sem submersão. 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 sem submersão. Comparando os resultados obtidos, 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.

Na apresentação do trabalho observa-se que, para o equipamento tipo jato cavitante, não foram apresentados dados com relação ao tipo de bocal e diâmetro de orifício empregados, essenciais para a reprodução dos ensaios. O equipamento aparenta ser muito útil, mas não possui todos os elementos necessários para permitir a sua construção. O esquema apresentado do equipamento é bastante simplificado. Os autores foram contatados, mas não responderam.

Billard e Fruman (1992), realizaram testes para determinar o efeito da modificação da turbulência a montante do convergente de um Venturi no aparecimento da cavitação. Isso foi feito introduzindo-se um pequeno disco de cantos vivos a montante do convergente. A introdução do disco provocou o retardamento no aparecimento da cavitação, quando comparada à situação de ensaio sem o obstáculo. Para análise dos resultados foi verificada a mudança do perfil de velocidades na seção do disco, utilizando um anemômetro a laser.

Observa-se que o dispositivo Venturi pode ser utilizado para avaliação do desgaste por cavitação. Contudo, as dimensões do Venturi deste ensaio não permitiriam o ensaio de concretos, dadas as dimensões reduzidas (0,05 m de diâmetro da tubulação). Ademais, no caso da erosão, não há interesse em retardar o aparecimento do fenômeno.

Coleman et al (1995) realizaram um estudo sobre erosão de cavitação em amostras metálicas, comparando dois tipos de ensaios: o túnel de cavitação e o equipamento tipo jato cavitante. O túnel de cavitação utilizado para o ensaio dos autores consistia de uma tubulação de 0,045 m por 0,045 m, onde era posicionada uma amostra cilíndrica de 0,025 m de diâmetro por 105 mm de comprimento posicionada como observado na Figura 4.11. A velocidade na seção aonde é posicionada a amostra é de 40 m/s e pressão de 0,63 MPa, a temperatura da água foi mantida a 20°C resultando em um índice de cavitação de 0,08. O equipamento tipo jato cavitante usado é mostrado na Figura 3.8. A pressão a montante do orifício para os ensaios foi de 14 MPa. Também, foi monitorada a pressão a jusante do orifício, na região de incidência na amostra, portanto região de baixa pressão. O valor encontrado pelos autores foi de 0,2 MPa. O orifício utilizado possuía 1 mm de diâmetro e 4 mm de comprimento, produzindo um jato de 167 m/s. O valor do índice de cavitação dos ensaios foi de 0,0143. A amostra era posicionada em um recipiente de 0,200m por 0,200 m, havendo uma distância de 0,040 m entre a saída do orifício e a amostra. A temperatura da água foi mantida a 20°C. Os tempos de testes para as amostras metálicas variaram entre 15 e 245 min. De maneira a aumentar a taxa de erosão das amostras, a velocidade do jato foi aumentada para 200 m/s, as pressões para a região de alta pressão e baixa pressão aumentadas respectivamente para 20 MPa e 0,286 MPa, respectivamente, sem, contudo alterar o índice de cavitação. A distância entre o bocal e a amostra foi diminuída para 0,034 m.

Comparando os mesmos materiais ensaiados nos dois tipos de equipamento, verificou-se que a ordem entre os que sofriram mais erosão diferiu. Segundo os autores, esse fato se deve ao comportamento dos materiais. São identificados quatro estágios de erosão:

- 1) Período de incubação, quando não há perda de material;
- 2) Período de acumulação associada com o aumento da taxa de erosão;
- 3) Período de atenuação, quando a taxa de erosão decresce;
- 4) Período de taxa de erosão constante.

Também, cada material possui uma curva característica própria de erosão, em que a extensão de cada estágio difere. Assim, quando levados em consideração esses fatores, segundo os autores, essa diferença entre os comportamentos dos materiais seria esperado. Dessa maneira, seria lógico comparar as taxas de erosão em um ponto de cada estágio, por exemplo, o máximo de erosão para o período de taxa permanente para o túnel e para o jato cavitante. Assim, o comportamento torna-se o mesmo para os dois tipos de equipamento.

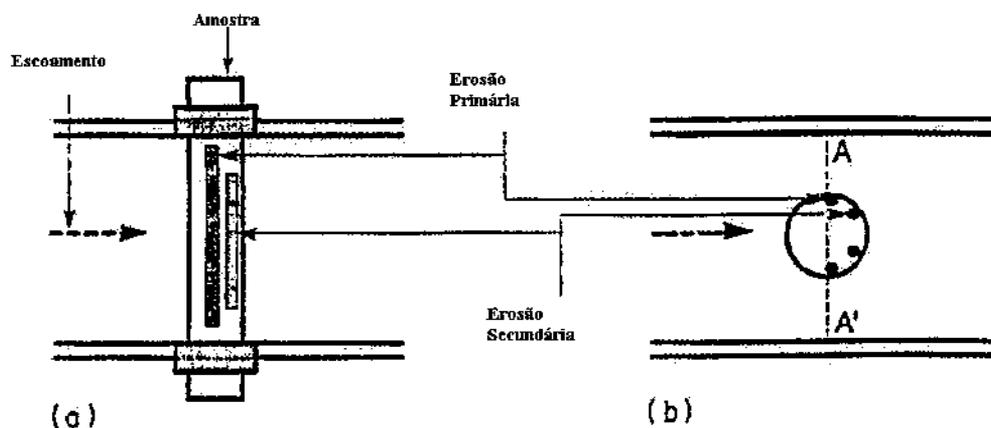


Figura 4.11. Diagrama esquemático do túnel de cavitação utilizado por Coleman et al (1995) nos ensaios. (a) vista lateral; (b) planta.

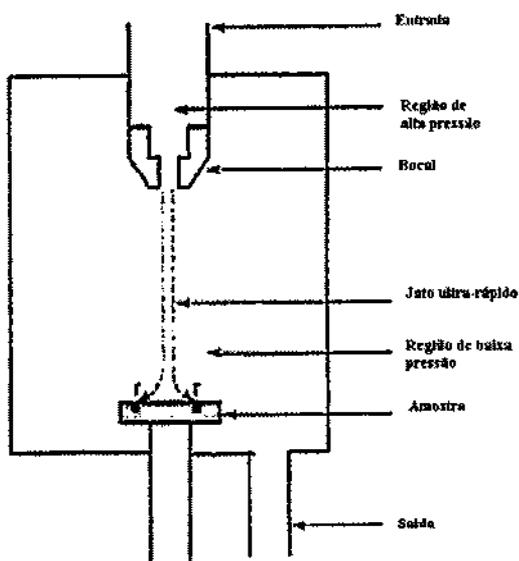


Figura 4.12. Diagrama esquemático do teste com jato cavitante utilizado por Coleman et al (1995).

Os autores concluem que a comparação entre as taxas de erosão e os tempos de ensaios necessários para os dois tipos de equipamentos não é simples, não sendo possível fazer comparações diretas. Mesmo assim, pareceu satisfatório aos autores a substituição do túnel pelo equipamento jato cavitante para a realização de ensaios de desgaste de materiais metálicos submetidos ao efeito erosivo da cavitação.

Neste trabalho, são comparados dois métodos de ensaios de cavitação: o túnel de cavitação e o jato cavitante. No caso do jato cavitante, o bocal utilizado foi único e bastante simples, de forma cilíndrica, ou seja, não houve a preocupação no desempenho que diferentes geometrias de bocais ocasionam nos ensaios. Como a maioria dos trabalhos existentes, o intuito dos autores foi testar materiais metálicos, sendo feita uma análise do comportamento erosivo dos mesmos submetidos aos ensaios de cavitação. O equipamento, da maneira como foi concebido, sem as alterações de dimensões, pressões e velocidades, não serve para o ensaio de concretos. Os autores calcularam o índice de cavitação (σ) pela Equação (4.1):

$$\sigma = \frac{P_d - P_v}{P_u - P_v}, \text{ sendo} \quad (4.1)$$

p_d : pressão de jusante;

p_u : pressão de montante;

p_v : pressão de vapor.

A utilização da Equação (4.1) não é prática comum para o caso de um jato submerso, como se verifica em Falvey (1990), que recomenda a Equação (3.5) para o cálculo do índice de cavitação.

De maneira a expandir a gama de aplicações dos jatos ultra-rápidos, melhorar sua eficiência e precisão, necessita-se conhecer a sua estrutura com maior precisão, para utilizar o seu intenso poder destrutivo necessitando de mínima energia. Ikohagi et al (1996) apresentam a relação entre a velocidade de corte do jato e as características básicas do jato, dentre elas a região aonde há a predominância da cavitação. Geralmente, não é fácil realizar ensaios quando se refere à ação da erosão severa, pois demandam tempo e custo consideráveis. Esses problemas são minimizados ao se utilizar equipamentos que simulem os jatos ultra-rápidos. Os autores fizeram

observações da formação do jato usando uma câmara de alta velocidade. Na Figura 4.13, apresenta-se o equipamento utilizado por Ikohagi et al (1996). O reservatório superior da bancada de testes (confeccionado em lucite para a visualização do fenômeno) tem 1,84 m³ de capacidade e contém o bocal. Para prevenir a incorporação de ar no reservatório superior, foram injetados jatos fracos de água, na mesma direção do jato ultra-rápido através de quatro bocais de suporte. Como a existência de núcleos no líquido é um fator dominante para a ocorrência do fenômeno da cavitação, foi utilizado um reservatório subterrâneo de 180 m³ de capacidade, em que a água permaneceu por um longo período, tendo então, incorporado ar naturalmente. Para prevenir a incorporação de núcleos de ar no reservatório superior da bancada de testes (confeccionado em material translúcido para a visualização do fenômeno) e que contém o bocal, jatos “fracos” de água são injetados, em adição ao jato ultra-rápido, e na mesma direção deste, através de quatro bocais de suporte.

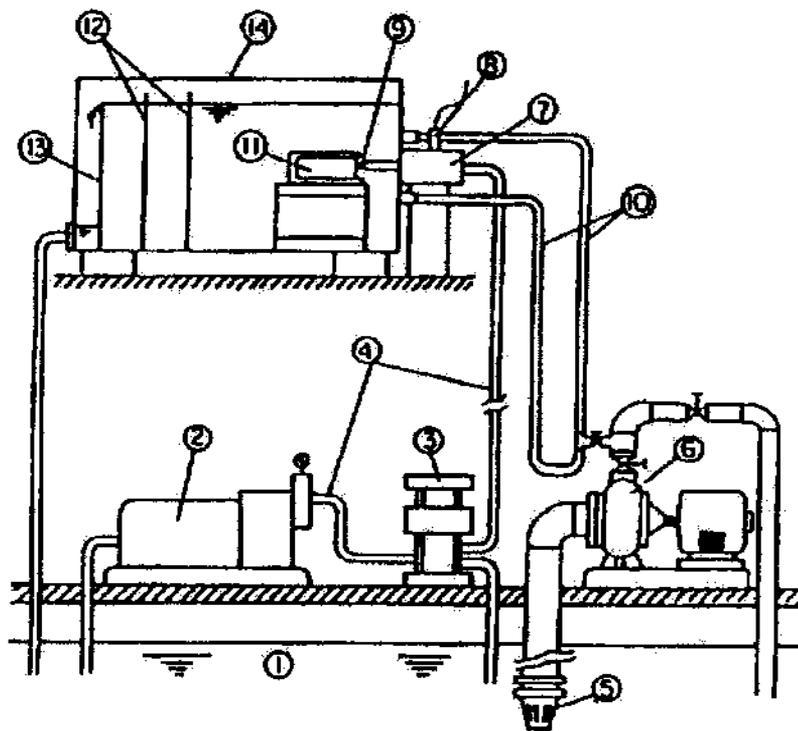


Figura 4.13. Esquema da instalação de Ikohagi et al (1996).

(1) Reservatório subterrâneo; (2) Bomba de pistão; (3) Válvula tri-direcional; (4) Tubulação-alta pressão; (5) Válvula de pé com crivo; (6) Bomba centrífuga; (7) Adaptador; (8) Transdutor de pressão; (9) Bocal; (10) Suporte do bocal; (11) Suporte de pressão; (12) Filme sensível; (13) Direcionadores de fluxo; (14) Reservatório superior.

O reservatório superior era primeiramente preenchido com água do reservatório subterrâneo utilizando-se uma bomba centrífuga e através dos bocais de suporte. Em seguida, a água era pressurizada para a formação do jato de alta velocidade utilizando-se uma bomba de pistão que fornecia pressão de 70 MPa e vazão de 0,367 l/s. O jato era injetado horizontalmente neste reservatório superior após passar por uma válvula tri-direcional. A pressão de injeção era continuamente monitorada e precisamente medida por um transdutor de pressão.

Para o surgimento do fenômeno da cavitação foram utilizados pelos autores três diferentes bocais: cônico de 20°, cilíndrico e divergente, como se observa na Figura 4.14.

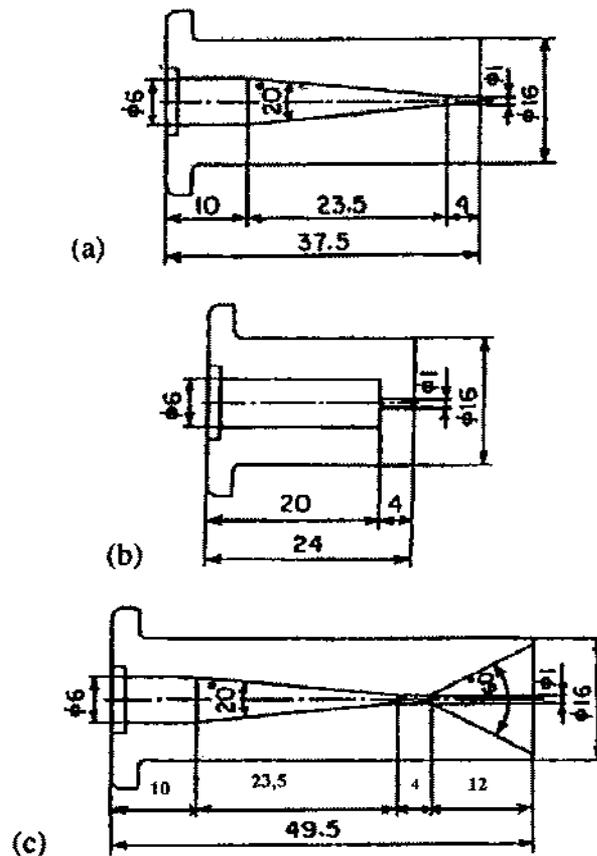


Figura 4.14. Bocais utilizados por Ikohagi et al (1996); (a) Bocal cônico; (b) Bocal cilíndrico; (c) Bocal divergente.

As distribuições espaciais das pressões de impulsão induzidas pela cavitação, que se esperam ser diretamente relacionadas ao poder destrutivo do jato, foram detectadas por um filme sensível a pressão. Para avaliar o efeito da distância que seja a ótima, no caso a mais destrutiva,

um retângulo de filme de 0,090 m de largura e 0,0250 m de comprimento é colocado paralelamente ao longo do eixo do jato. Os experimentos foram realizados para uma pressão de injeção de 30 MPa e para um tempo de ensaio de 10 s, variando-se as distâncias e os bocais. As pressões de impulsão locais mais altas foram detectadas por um detector especial que indica o valor médio dessas pressões dentro de um círculo de 2 mm de diâmetro.

Primeiramente, os aspectos do jato livre, não tendo uma amostra como alvo, foram observados através de fotografias capazes de registrar o movimento em alta velocidade do jato. Para a pressão de 5 MPa, os autores verificaram vórtices que se movem de uma maneira desordenada a partir da saída do orifício, aonde a cavitação aparece mais timidamente. À pressão de 70 MPa aparecem nuvens de cavitação em torno do vórtice. Próximo do orifício, nuvens de cavitação continuam a existir, mas maior quantidade se encontra mais distante da saída do orifício. Mais a jusante, a pressão rapidamente aumenta, as nuvens de cavitação rapidamente se dividem em pequenas bolhas e então desaparecem. Particularmente, para o caso típico de bocal divergente em que a cavitação apareceu de maneira mais severa que nos outros casos, isto leva a concluir que a cavitação será intensificada variando-se a geometria do orifício.

Em geral, a região de cavitação pode ser subdividida em duas regiões, uma dita subcavitante e a outra, supercavitante. Na região de subcavitação, o padrão de escoamento e suas características são pouco modificados pela cavitação, enquanto que na região de supercavitação é alterado significativamente. Ikohagi et al (1996) classificaram como subcavitante o escoamento a pressão de 5 MPa ($\sigma=0,2$) e como supercavitante a pressão de 70 MPa ($\sigma=0,002$).

A zona periférica do jato foi avaliada em detalhe através de inspeção visual das fotografias dessa área para os três tipos de bocais e pressões de 10, 30, 50 e 70 MPa. Verifica-se claramente que as nuvens de cavitação ocorrem mais explosivamente à medida que a pressão de injeção aumenta, ou seja, à medida que o índice de cavitação decresça. Ademais, há uma dependência muito grande com relação às características dos bocais. Para o bocal cônico, aonde o escoamento suavemente converge por um ângulo de 20°, a sua aparência pode ser dita “suave”. Para o bocal cilíndrico aonde o escoamento converge rapidamente próximo ao orifício, causando flutuação no escoamento, os jatos são instáveis. Por exemplo, para a pressão de 70 MPa “aglomerações singulares de nuvens de cavitação” podem ser freqüentemente observadas,

indicando que as nuvens de cavitação desenvolveram-se muito mais facilmente. Para o bocal divergente, no qual um duto divergente é acoplado a jusante da saída do jato de maneira a provocar um jato não permanente, as nuvens de cavitação também crescem rapidamente após a injeção, acompanhadas por nuvens de cavitação altamente erosivas.

Ikohagi et al (1996) concluem a partir dos ensaios realizados que as pressões de impulsão ao redor dos jatos submersos são maiores para o bocal divergente e menores para o bocal cônico. Em sumá, as pressões de impulsão dependem do comportamento não permanente resultante da geometria do bocal. Também, concluem que os aspectos dos jatos ultra-rápidos, ou seja, aqueles acima de 10 MPa, são diferentes daqueles para jatos com velocidades menores (referentes a pressões menores que 5 MPa), sendo os primeiros caracterizados pelo desenvolvimento da cavitação explosiva. A camada de cisalhamento diminui significativamente com o aumento da distância ao alvo, uma vez que as pressões aumentam rapidamente devido a desaceleração do escoamento. Os autores citam, também, que foram observados filamentos de vórtices.

Nota-se que os autores realizaram pesquisa com o equipamento tipo jato cavitante objetivando a verificação visual do comportamento e da configuração do jato, ao contrário do que é usualmente feito, quando se utilizam amostras de algum material padrão para verificar a eficiência das condições de ensaios. No caso deste trabalho, os autores realizaram ensaios com diferentes tipos de bocais e também diferentes pressões de ensaios, analisando os efeitos das pressões e das geometrias dos bocais nos jatos gerados. O equipamento apresenta certa complexidade para a sua execução. Pressões de ensaio da ordem de 70 MPa para concretos não são adequadas pois provocariam o corte das amostras, sem a possibilidade de análise da evolução da erosão de cavitação. O autor não apresenta detalhes da instalação no que diz respeito aos “jatos fracos” introduzidos nos ensaios de maneira a evitar a incorporação de ar, limitando-se a citar o uso deste recurso.

A fim de aumentar a eficiência das bombas centrífugas e, em particular, para permitir que possam funcionar sob baixas pressões de sucção, um dispositivo denominado indutor é utilizado na sucção da instalação. Este dispositivo é concebido para que possa suportar a cavitação e permitir obter na saída uma pressão mais elevada, de tal maneira que os equipamentos posteriores ao dispositivo funcionem sem cavitação. Joussellin, Bernardi e Dumont

(1997) identificaram dois problemas essenciais com relação ao fenômeno de cavitação nestes indutores. São os seguintes: as massas de vapor produzidas pelo fenômeno da cavitação obstruem os canais que podem provocar o mau funcionamento nas máquinas (bloqueio) e a evolução temporal das cavidades pode provocar a aparição de frequências nefastas para o motor e sua estrutura. Assim, os autores estudaram o efeito da cavitação neste indutor, de maneira a estabelecer os regimes de cavitação em função dos parâmetros velocidade e pressão.

A qualidade do líquido tem um papel fundamental para o desenvolvimento da cavitação. De um ponto de vista prático, os resultados obtidos em modelos reduzidos, como túneis hidrodinâmicos, não são transportáveis para os protótipos, a menos do efeito de escala. Assim, a quantificação dos núcleos de ar é fundamental para a compreensão do fenômeno da cavitação, bem como na validação dos ensaios. Para tanto, Pham, Michel e Lecoffre (1997) utilizaram um Venturi para quantificar os núcleos de cavitação. A medição através do dispositivo se faz pela leitura óptica, ou pela acústica, aonde se registra as implosões por segundo pelo divergente. Realizando essa medida para várias pressões, determina-se a concentração de núcleos em função da pressão.

Boehm, Stoffel e Ludwig (1997) comentam que o estudo da cavitação em bombas e turbinas de água ainda requer investigações teóricas e experimentais. As características da cavitação que parecem ser principalmente responsáveis pela agressividade da erosão são: o volume de vapor, o comportamento não permanentes da cavitação e do campo de pressões. As características de escoamentos não cavitantes, por exemplo, distribuições de pressões, tipo de camada limite e separação do escoamento também tem influência no comportamento da cavitação para mesmos números de Reynolds. As investigações desses autores procuram encontrar a dependência da agressividade da erosão de cavitação, com relação às características típicas da cavitação e a correlação entre o escoamento não cavitante e cavitante, por exemplo, no que se refere às distribuições de pressão. O conhecimento dessas influências, segundo os autores, irá ajudar a estimar o risco de erosão em um estágio inicial de projeto dos equipamentos hidráulicos, por exemplo, com base no cálculo da distribuição de pressões.

Para os ensaios, os autores propõem a cavitação gerada a partir de uma saliência construída no fundo de um túnel. Na região a jusante da saliência, aonde se verifica a formação

da cavitação, transdutores de pressão são instalados, de tal maneira a detectar as pressões transitórias resultantes da cavitação.

Constata-se que a instalação proposta pelos autores poderia sofrer modificações de tal maneira a se adotar a verificação do comportamento de amostras de concreto. Contudo, haveria dificuldade no que diz respeito à instalação dos transdutores de pressão nesta região, uma vez que o ensaio de concretos exige que haja erosão do mesmo. No caso dos autores não foram testadas amostras, tão somente se limitaram a simular o fenômeno.

Cangioli e Manfrida (1997) realizaram um trabalho sobre as melhoras das técnicas acústicas para detectar a cavitação inicial, utilizando um transdutor sensível (um pequeno hidrofone) e um moderno analisador de espectro com uma escala dinâmica da ordem de 90 dB capacidade de processamento avançada.

O estudo da dinâmica de cavidades gasosas nos líquidos é o objeto da pesquisa de Isselin et al (1997). Inicialmente, a compreensão inicial dos mecanismos fundamentais da cavitação foram estudos com uma “bolha isolada”. Do ponto de vista experimental, a técnica de “cavitação óptica” é particularmente bem adaptada a este tipo de estudo. Este método não intrusivo permite o conhecimento perfeito da posição e da criação da bolha, o controle da dimensão assim como o número de bolhas. O estudo apresentado pelos autores concerne à dinâmica de uma bolha gerada por laser próxima a uma parede sólida. Uma bolha que oscila próxima a uma parede sólida tem uma zona de influência caracterizada pela razão da distância entre a posição inicial do centro da bolha à parede e o raio máximo da bolha, que no momento da implosão não é esférica. Um exame da superfície próxima do local aonde se produz o fenômeno, mostra deformações plásticas com perda de material. As pulsações da bolha dão origem ao ruído devido à cavitação provocado pela emissão de ondas acústicas. O estudo desses autores visa determinar as condições do jato e da onda de choque em termos de agressão.

Reboud e Patella (1997) afirmam que a dificuldade de analisar o fenômeno de erosão provocado pela cavitação tem lugar em grande parte devido a diversidade de formas que podem afetar o material. A complexidade dos fenômenos produzidos no instante da implosão das bolhas de vapor na vizinhança de superfícies sólidas, a escala reduzida tanto no tempo quanto no espaço

limitam a possibilidade de investigação experimental direta. A implosão de uma simples bolha no contato com a parede vem acompanhada do efeito de formação de uma onda de choque e/ou de um jato dirigido à direção da parede. A falta da observação direta dos instantes que antecedem este processo gera ainda a incerteza quanto ao cenário exato que conduz a uma ou muitas marcas em um material submetido à implosão de uma bolha isolada ou ao processo de erosão completo devido à cavitação. Para estudar, então, a interação fluido-estrutura com relação a erosão de cavitação foi desenvolvido um modelo numérico de resposta dinâmica de um sólido elastoplástico submetidos a esforços transitórios rápidos e também, um roteiro de cálculo em fluido compressível, desenvolvido para estudar os fenômenos de propagação em um líquido de ondas de subpressão de grande amplitude.

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 aonde ocorrem são de dimensões maiores. Assim, há um certo número de casos em que 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 sistemas de lubrificação e controles de escoamento por restritores de seção.

Percebe-se que as pesquisas foram voltadas às 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. Para tanto, é utilizado um equipamento aonde se gera a cavitação a partir da instalação de uma esfera em rotação próxima a uma parede plana ou uma parede curva. Este tipo de equipamento, dadas as dimensões da câmara de testes, não é apropriada para o estudo de concretos submetidos ao efeito da cavitação.

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.

Joussellin, Bernardi e Dumont (1997), Pham, Michel e Lecoffre (1997), Boehm, Stoffel e Ludwig (1997), Cangioli e Manfreda (1997), Isselin, Alloncle e Autric (1997), Reboud e Patella (1997), Boudia et al (1997) e Jeannerad e Nicole (1998) utilizaram diferentes métodos de medição dos efeitos da cavitação, estudando situações inclusive de predição do aparecimento do fenômeno. A aplicação das pesquisas, contudo, se fixa nas aplicações industriais, não sendo possível a sua utilização para o caso dos concretos.

Momber (2000) estudou a erosão de concretos submetidos a curtos períodos de exposição à cavitação. O autor definiu como curto período, a exposição inferior a 10 s. A cavitação de curta duração pode aparecer em um jato de água de alta velocidade durante o processo de “hidrodemolição”, ou seja, pelo corte do concreto submetido a um jato de água de alta velocidade. Scheuer (1985) citado por Momber (2000) pesquisou a influência da superfície sólida e das velocidades no aparecimento da cavitação e relata que, independente da geometria, uma irregularidade de 5 mm inicia o processo cavitante mesmo para velocidades relativamente baixas como 4,0 m/s. Esta velocidade será alcançada em qualquer jato que desenvolva uma pressão de estagnação de 25 MPa na superfície sólida. Conclui Momber (2000) que a cavitação com curta duração é um método promissor para o estudo dos mecanismos de remoção de material atuando nos primeiros estágios da cavitação.

Para o estudo de Momber (2000) foi utilizado um equipamento que consistia de uma câmara de cavitação como pode ser observado na Figura 4.15. Para todos os testes manteve-se o índice de cavitação fixo em $\sigma=0,075$, a uma temperatura de 25°C. Foram realizados ensaios para amostras em dois tempos de exposição: 10 s e 2 s. O tamanho das amostras foi de 0,06 m de comprimento, 0,03 m de largura e 0,01 m de altura. A Foto 4.1 mostra uma amostra ensaiada neste equipamento para um período de ensaio de 10 s. Para as amostras submetidas a um período de exposição de 2 s não foi detectada perda de peso. Porém, comparando as superfícies, antes e depois dos ensaios, verifica-se mudança significativa na superfície após os ensaios, tornando-se muito irregular. Essas mudanças na superfície não foram analisadas quantitativamente pelo autor.

Mas, ilustram que no primeiro estágio da cavitação a superfície é microscopicamente modificada e que essa rugosidade inicial fornece as condições para o subsequente escoamento cavitante.

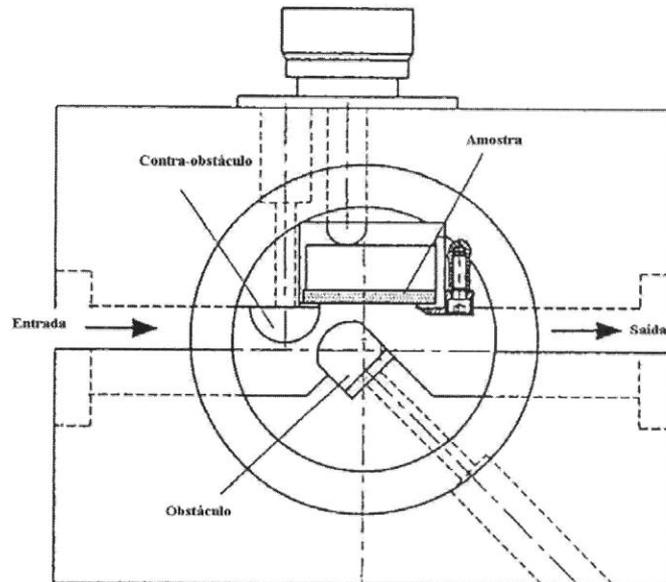


Figura 4.15. Esquema da câmara de cavitação utilizada por Momber (2000).

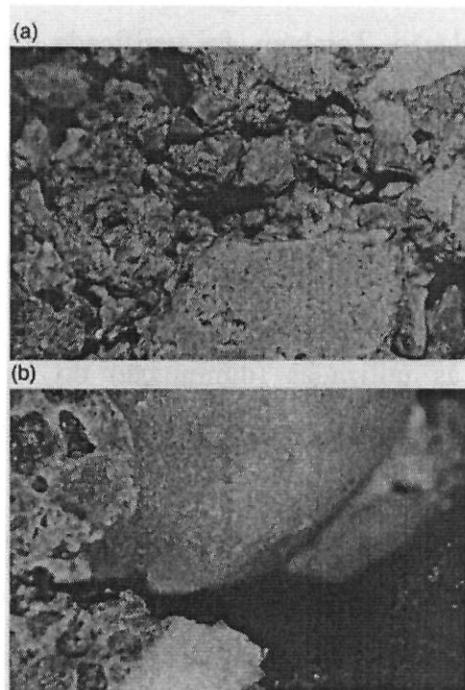


Foto 4.1. Fotos das amostras usadas por Momber (2000) após o ensaio com duração de 10s; (a) Aumento de 7x; (b) Aumento de 17x.

Observa-se que o autor se fixa na realização de ensaios de curtíssima duração, apresentando situações em que apenas verificava-se mudança da superfície da amostra ensaiada através da análise da microscopia da superfície. Para a verificação de resistência das amostras, sobretudo com relação ao concreto, material heterogêneo, torna-se difícil a comparação do comportamento das diferentes amostras em um período tão curto. Além disso, dimensões de amostras tão reduzidas quanto às deste trabalho podem não refletir o verdadeiro comportamento dos materiais sob o efeito desgastante da cavitação, devido à heterogeneidade do material, quando concretos são ensaiados.

Dalfré Filho (2002) desenvolveu um equipamento tipo jato cavitante com a utilização de bomba de deslocamento direto (Figura 4.16). 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. Também, foi verificada a possibilidade da utilização de bomba centrífuga em substituição à bomba de deslocamento. A tentativa de se utilizar uma bomba simples e facilmente encontrada no mercado, não se mostrou eficiente, pois não se constatou a presença de cavitação, não havendo danos mesmo após grande número de horas de testes (amostra intacta). Assim, a existência de altas pressões disponíveis é fator necessário para o desenvolvimento da cavitação. O autor sugere o uso de bomba de deslocamento direto com pressões disponíveis maiores às utilizadas (diminuição do valor do índice de cavitação) diminuindo os tempos de testes. Também ressalta que a utilização de bocais, de diferentes geometrias e diâmetros, necessitaria 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.

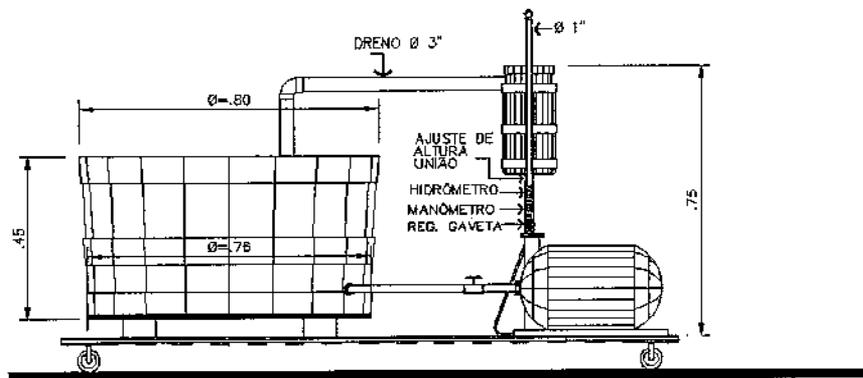


Figura 4.16. Esquema do banco utilizado por Dalfré Filho (2002).

4.2 COMENTÁRIOS

Conclui-se, a partir das referências consultadas, que existem diferentes equipamentos e critérios para ensaios coma finalidade de analisar o fenômeno da cavitação, constatando-se que não existe uma padronização de ensaios.

Verifica-se, também, que várias pesquisas foram feitas para estudar o comportamento da cavitação para aplicação industrial, na área mecânica, utilizando-se amostras de materiais metálicos. Contudo, muitos dos equipamentos utilizados nestas pesquisas não possibilitam o ensaio de concretos, material heterogêneo, especialmente no que diz respeito às dimensões das câmaras de ensaios, em que estão posicionadas as amostras.

Alguns equipamentos desenvolvidos conduzem a tempos de ensaios longos, devido às baixas velocidades do escoamento. Também, verifica-se a possibilidade de simplificação de alguns equipamentos, diminuindo custos e os tempos de ensaios.

Dadas às características do fenômeno da cavitação, somente através de estudos experimentais poderá se avaliar o desgaste provocado. E no caso das estruturas hidráulicas o problema é complexo, pois se verifica o efeito simultâneo do fenômeno da cavitação e do impacto de um jato de alta velocidade.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentadas as características da bancada de ensaio, dos equipamentos de medição utilizados, assim como o método de ensaio. A execução do banco de ensaios e a aquisição dos equipamentos empregados foram possíveis através do Auxílio à Pesquisa da FAPESP, Processo n ° 02/10348-0.

5.1 BANCADA 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 Figura 5.1 se apresenta o esquema da bancada de ensaios. A água é conduzida do reservatório até a instalação de ensaio por meio de uma bomba triplex de deslocamento positivo, modelo PROMINAS BPS-327-025-MP, pressão de operação de 14,5 MPa e vazão de $4,84 \times 10^{-4}$ m³/s. O motor acoplado é de potência de 12,5 cv, 1200 rpm, 220 V, trifásico. Na Foto 5.1 pode ser visualizada a bancada de ensaios construída. As amostras são ensaiadas dentro de um recipiente metálico, que possui duas janelas de 0,12 m de diâmetro em vidro de espessura 0,030 m, que permitem visualizar os ensaios, mantendo-se a segurança na operação, apesar das pressões elevadas dos mesmos. Este recipiente possui dois drenos, um superior de diâmetro de $6,35 \times 10^{-2}$ m, para descarregar o líquido que passou pela instalação. Um segundo, localizado na parte inferior do recipiente, de diâmetro $1,27 \times 10^{-2}$ m, servindo para eventual esvaziamento do recipiente e para limpeza. Outra característica da instalação é que o recipiente para colocação das amostras está equipado com trilhos e rodízios que permite o seu deslocamento no sentido axial. Dessa maneira é possível registrar os valores de impacto do jato d'água sobre as amostras durante os ensaios para diferentes alturas.

colocação do filtro evita que impurezas no escoamento possam causar o entupimento do bocal de pequeno diâmetro de orifício, causando elevação brusca das pressões e auxilia na manutenção da bomba. Também, previne o efeito de erosão da amostra devido à mistura água-impurezas. O tubo flexível de recalque é constituído de borracha com duas camadas de malha de aço de baixa expansão volumétrica, diâmetro de $1,27 \times 10^{-2}$ m. Na Figura 5.2 encontram-se esquematizados os modelos das conexões e mangueiras bem como a posição de cada uma delas na instalação.

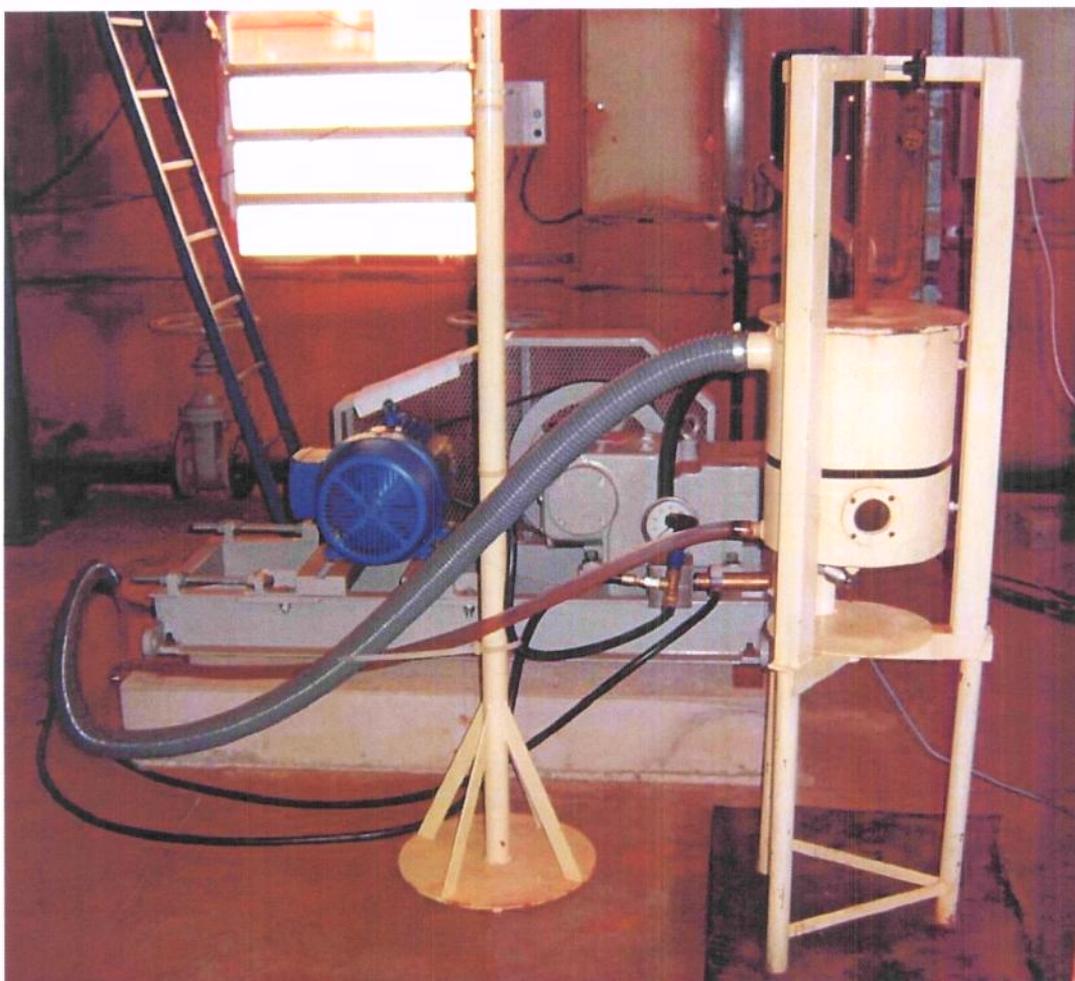


Foto 5.1. Bancada de testes utilizada neste trabalho.

No extremo final da tubulação de recalque são adaptados diferentes bocais, construídos em aço inox, com diferentes geometrias e que são utilizados para simular o efeito combinado do escoamento em alta velocidade e da cavitação.

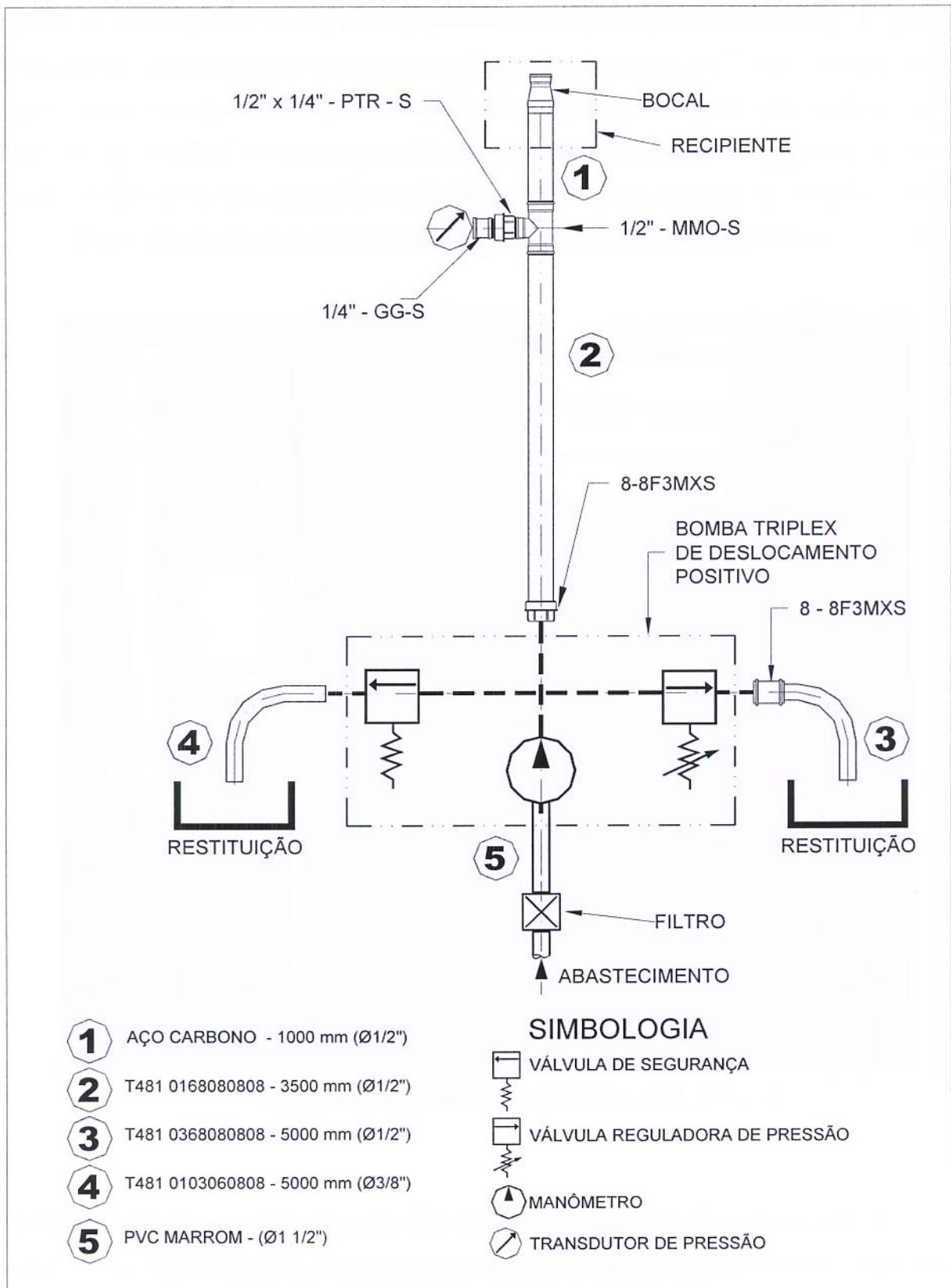


Figura 5.2. Esquema dos componentes da instalação.

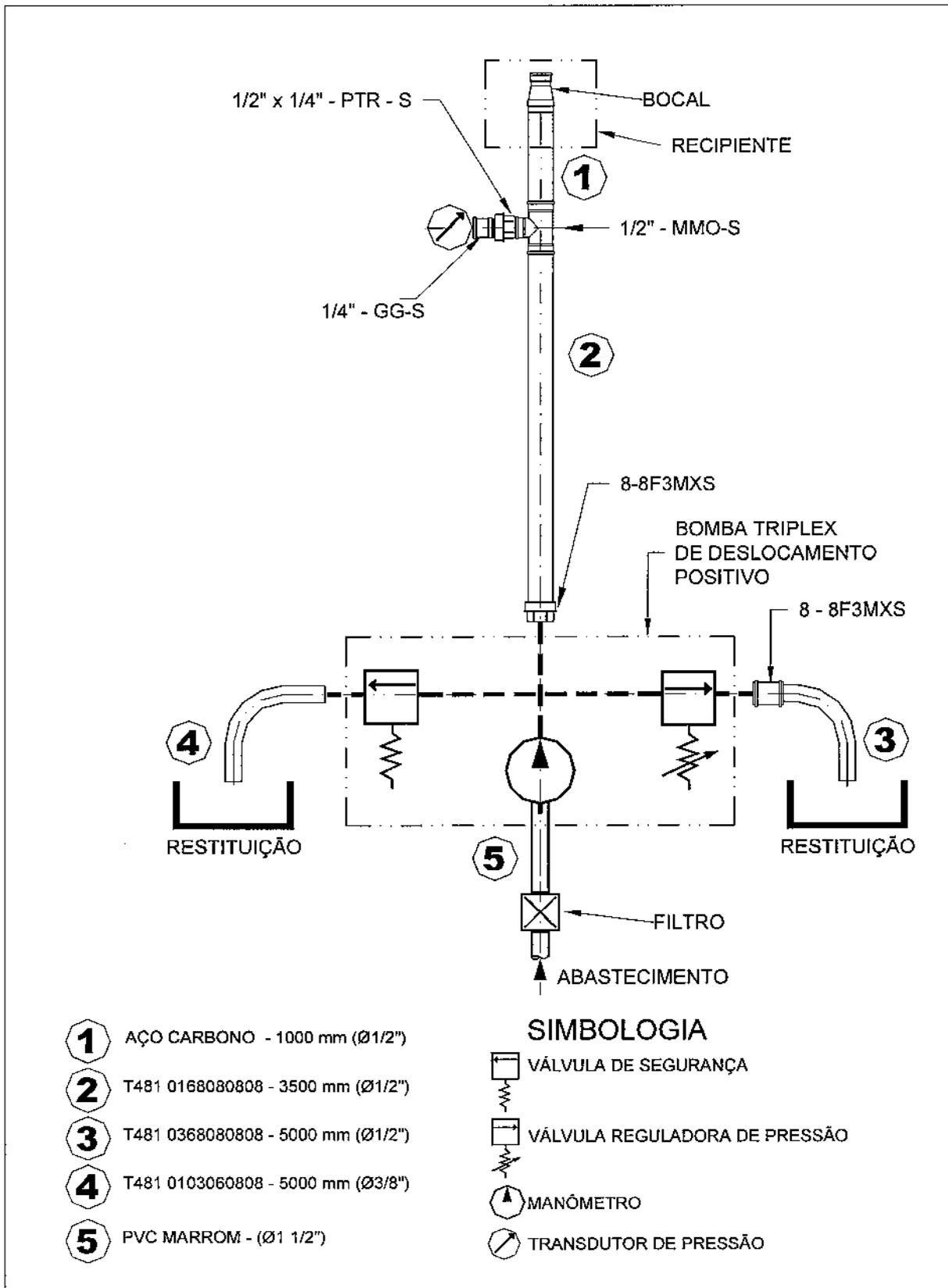


Figura 5.2. Esquema dos componentes da instalação.

5.2 TIPOS DE BOCAIS

Para a simulação do efeito da cavitação e do impacto do jato d'água sobre as amostras foram empregados diversos bocais com diferentes geometrias conforme se observa na Figura 5.3. O objetivo da variação do tipo de bocal é verificar qual o efeito da geometria no desempenho do equipamento. O bocal cônico de 20° foi utilizado por Dalfré Filho (2002) para verificar o efeito desgastante da cavitação em amostras de concreto. O bocal logarítmico foi usado por Houlston e Vickers (1978) para o desenvolvimento de jatos de água de alta velocidade, apresentando bom desempenho para a formação do jato cavitante. Também, foram construídos outros dois tipos de bocais. Um deles possui geometria circular com raio de 12,5 mm e o outro, geometria cônica de 132°. Para cada bocal, foram construídos dois modelos, um com saída em arestas vivas e outro, em arestas chanfradas, conforme Figura 5.3. Ademais, foi empregado um bocal disponível no mercado, denominado de MEG2510, com ângulo de abertura do jato em leque de 25° que possui um difusor interno (vane) que estabiliza a turbulência do jato no bocal, proporcionando a máxima integridade e alto impacto do mesmo.

Para a confecção do bocal logarítmico foi empregada a Equação (5.1) por Houlston e Vickers (1978).

$$r = A \ln\left(\frac{x}{B}\right), \text{ sendo:} \quad (5.1)$$

r: medida na ordenada;

x: medida na abscissa;

A, B: coeficientes de ajuste.

Como os autores não apresentaram nenhuma outra medida ou característica, foi adotado o seguinte procedimento para determinar os valores dos coeficientes de ajuste A e B. Dadas às condições iniciais (diâmetro do bocal) e final (diâmetro da mangueira), minimizou-se a área sob a curva logarítmica. Dadas as condições estabelecidas, os resultados obtidos demonstraram a inviabilidade de construção do mesmo, pois, para as dimensões deste trabalho, o segmento logarítmico obtido constitui-se, praticamente, em uma reta.

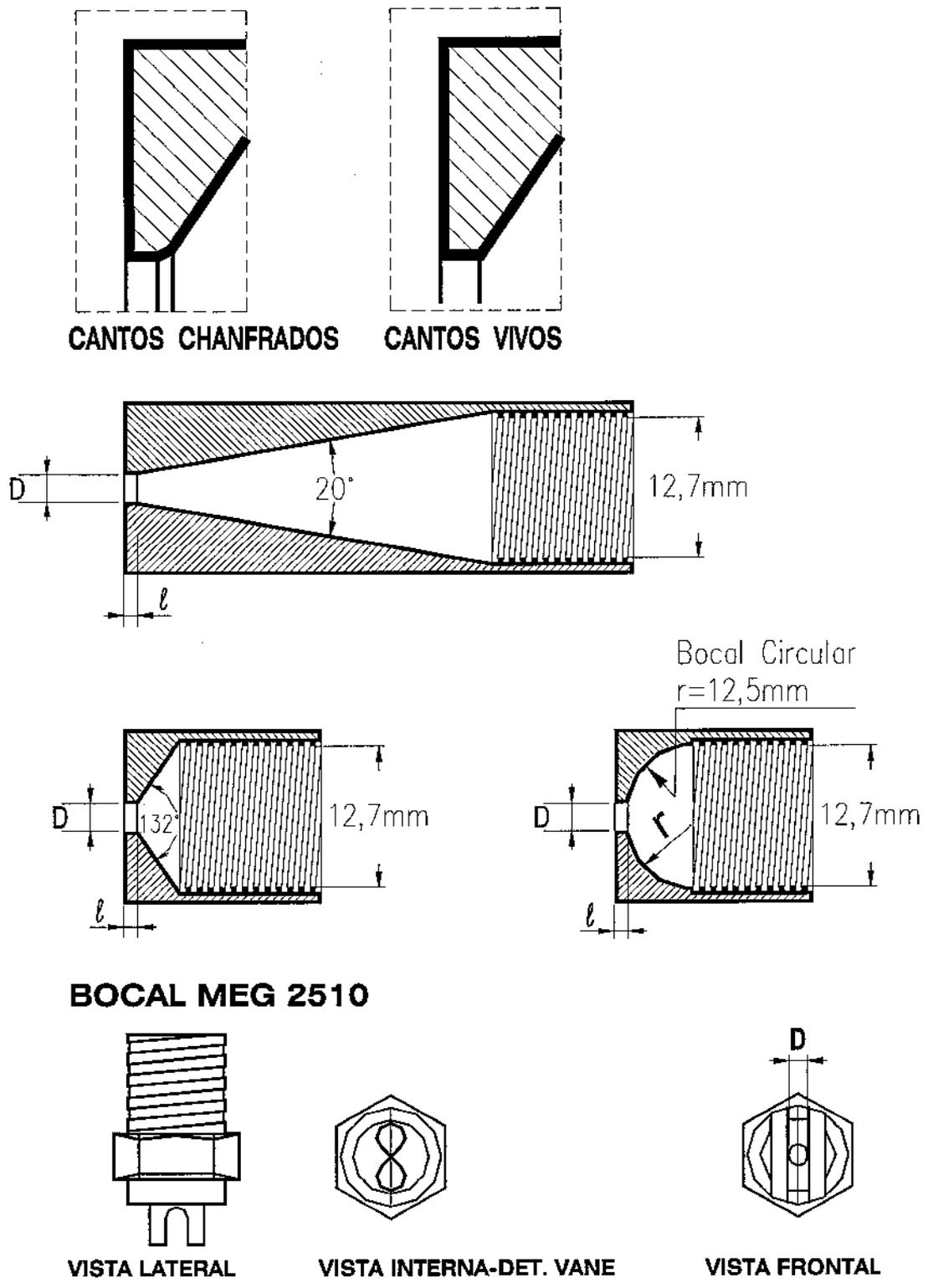


Figura 5.3. Esquema dos bocais utilizados nos ensaios.

5.3 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Para realizar-se o controle das condições de ensaio são utilizados diferentes equipamentos de medição. Na saída da bomba, ou seja, entre a bomba e a tubulação de recalque, é instalado um manômetro de escala 0 a 16 MPa. No extremo final da tubulação flexível, ou seja, a montante do bocal, localiza-se um transdutor de pressão absoluta de 0 até 20 MPa. Um acelerômetro, com sensibilidade de $0,982 \text{ mV/m/s}^2$ e resposta plana de 1 a 25000 Hz, instalado no recipiente metálico, permite obter a vibração nos testes expressos em termos de aceleração. Para poder visualizar-se o fenômeno foi usado o recurso da luz estroboscópica que emite um sinal luminoso de 1 até 200 Hz.

O equipamento tipo jato cavitante simula a ação de danos devido à cavitação e também o impacto que podem estar presentes nas estruturas hidráulicas. Para avaliar o impacto desgastante da amostra é utilizada uma célula de carga de 0 a 100 Kgf. Como o recipiente é livre para se deslocar no sentido axial, é possível obter leituras do impacto do jato sobre a amostra em diferentes condições. A temperatura e a concentração de oxigênio da água são monitoradas com um oxímetro e a temperatura ambiente, utilizando um higrotermômetro.

No Quadro 5.1 encontram-se as especificações dos equipamentos de medição usados nos ensaios. Na Figura 5.4 é esquematizada a posição de cada instrumento na bancada.

De maneira a auxiliar na obtenção dos resultados do efeito provocado pela cavitação foi utilizada uma lupa binocular de aumento 160x e outra lupa binocular de aumento 40x para a contagem dos “pits” das amostras.

5.4 MÉTODO DE ENSAIO

A instalação é abastecida com água não recirculada. Caso a água seja recirculada por um túnel de água ou uma bomba, o aspecto dos núcleos e a quantidade de ar dissolvida são artificialmente alteradas e as condições para ocorrência do fenômeno, igualmente alteradas. A água é conduzida até o recipiente metálico, que contém as amostras, através da mangueira de borracha de baixa expansão volumétrica. No extremo final desta tubulação encontra-se o bocal

intercambiável. A jusante do orifício ocorre o jato cavitante que incide sobre a amostra, desgastando-a.

Quadro 5.1. Especificações dos equipamentos de medição utilizados nesta pesquisa.

| Equipamento | Marca | Modelo | Escala de medição | Incerteza |
|--|-------------------------|------------------|---------------------------|-----------|
| Transdutor de pressão (FAPESP, Proc. n ° 02/10348-0) | HBM | K-P8AP-231B-17A5 | 0-20 MPa | ±0,1 % |
| Célula de carga (FAPESP, Proc. n ° 02/10348-0) | HBM | Z6FD1 | 0-100 Kgf | ± 0,1 % |
| Acelerômetro (FAPESP, Proc. n ° 02/10348-0) | Bruel & Kjaer | 4397 | 1-20 KHz | ±0,3 % |
| Estroboscópio (FAPESP, Proc. n ° 02/10348-0) | Shimpo | DT-725(DC) | 1-200 Hz | ±0,02 % |
| Higrotermômetro | Pacer Industries Inc | HTA4200 | -20° a +80° C | ±0,2 % |
| Oxímetro | ORION | 810 | -5° a 45° C 0 a 20 ppm | ±1% |
| Lupa binocular | Carl Zeiss | 68 0620 | - | - |

O recipiente é preenchido com água para simular a implosão das bolhas devido à cavitação. A água que entra no recipiente escoava através do dreno superior e não retorna a instalação de ensaio, sendo derivada para o canal de restituição ao reservatório inferior do laboratório. A distância entre o jato e a amostra, assim como a geometria do bocal e o diâmetro do orifício são variáveis nos ensaios que serão definidas através dos testes.

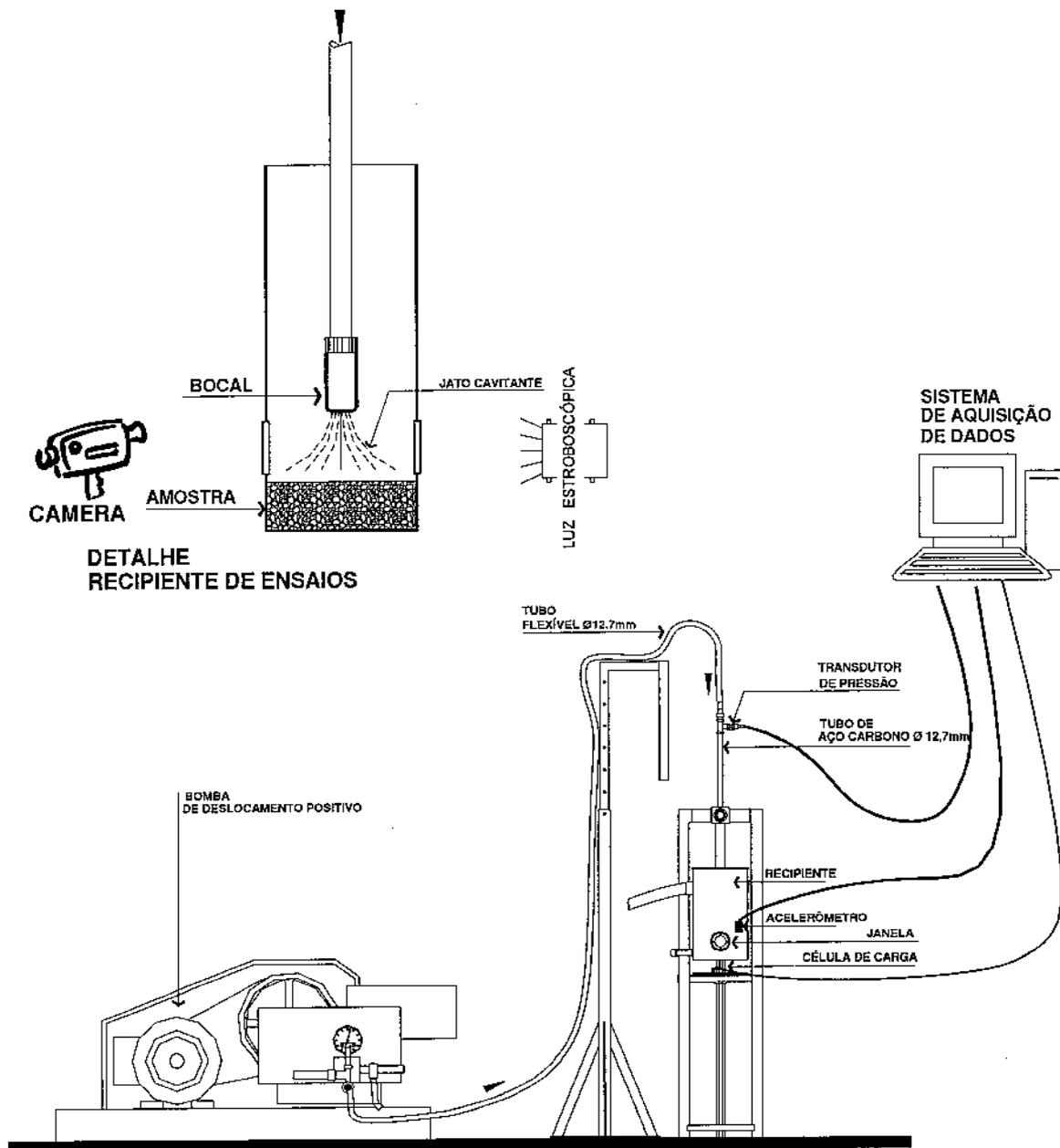


Figura 5.4. Posição da instrumentação na bancada de testes.

De maneira a garantir a operação adequada e segura da instalação foi confeccionada uma tabela com a seqüência de etapas a serem obedecidas. No Anexo A se apresenta o procedimento de ensaios adotado.

A cada minuto de teste, até o tempo de 5 min as amostras eram retiradas, a área do dano medida, contava-se o número de “pits” e as amostras eram então fotografadas. Em seguida,

realizavam-se ensaios de mais 15 min ininterruptos, ou seja, o tempo total de teste de cada amostra foi de 20 min. Neste tempo, novamente as amostras eram retiradas, media-se a área afetada, contavam-se os “pits” e, em seguida, as mesmas eram fotografadas.

5.4.1 PRIMEIRA FASE DOS ENSAIOS

Para a primeira fase dos ensaios foram utilizadas amostras de alumínio liga 6351T6V0, de diâmetro 0,15 m e 6,5 mm de espessura, para determinação da influência do diâmetro do orifício nos testes. O bocal cônico de 20°, nos diâmetros de 2 mm e 3 mm, a uma distância de 0,05 m entre o bocal e a amostra, foi utilizado, a partir dos resultados obtidos por Dalfré Filho (2002). Neste trabalho, o autor utilizou este bocal para produzir o efeito do jato cavitante com orifício de 3 mm e pressão de alimentação da bomba de 3,50 MPa, à distância de 0,05 m em amostras de concreto.

Em seguida, verificou-se o efeito da distância do bocal à amostra com relação à erosão. Três distâncias foram empregadas, 0,05 m, 0,10 m e 0,15 m. Novamente, o bocal cônico de 20° foi utilizado nesta primeira fase. Desta forma, foi definida a distância a adotar para os ensaios das outras etapas.

Tendo-se verificado o efeito desgastante nas amostras causado pela variação da distância do bocal à amostra e uma vez definida a distância que apresenta os maiores valores de desgastes, procederam-se aos ensaios com os bocais cônicos de 132°, bocais circulares e bocais MEG2510 para a distância ótima obtida. Empregaram-se amostras de alumínio liga 6351T6V0 para verificação dos danos ao longo do tempo.

5.4.2 SEGUNDA FASE DOS ENSAIOS

Para esta etapa se programaram os testes nas amostras de concreto. Deste modo, foram confeccionadas amostras de concreto de alto desempenho. Os agregados foram separados, limpos, estocados em laboratório e, no dia seguinte, procedeu-se à moldagem dos corpos de prova. Foram feitos corpos de prova de diâmetro 0,10 m e altura 0,20 m para ensaios de

resistência à compressão axial e amostras de diâmetro 0,15 m e 0,04 m de espessura para ensaios de cavitação para cada dosagem. Os resultados de resistência à compressão axial e resistência à cavitação são calculados fazendo-se a média dos resultados individuais das amostras. As composições e resistências às compressões axiais são mostradas no Quadro 5.2. Foi utilizado superfluidificante até a proporção de 2% sobre a massa do cimento de maneira a se obter um abatimento do cone de Abrams de $0,05\text{m} \pm 0,01\text{m}$. Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a norma NBR 5738.

Quadro 5.2. Características das amostras de concreto usadas nos ensaios.

| Amostra | Traço (cimento: agregados) em massa | Relação água/cimento | Tipo de agregado graúdo | Adição | Resistência à compressão axial (MPa) |
|---------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------|--------------------------------------|
| A | 1:4 | 0,3 | Calcário | - | 54,45 |
| B | 1:4 | 0,3 | Granito | - | 62,52 |
| C | 1:4 | 0,3 | Granito | Sílica ativa * | 83,38 |

* Na proporção de 8% sobre a massa do cimento.

Estas amostras foram ensaiadas com os bocais que causaram as maiores taxas de desgaste nas amostras de alumínio à distância ótima.

De maneira a constatar o aparecimento do fenômeno de cavitação nos testes e verificar o efeito da erosão nas amostras foram feitos testes sem submersão, ou seja, com o jato livre incidindo diretamente sobre a amostra de concreto. Para tanto, utilizar-se-á o bocal de melhor desempenho obtido e a amostra de concreto mais resistente à ação da cavitação. O método de ensaio obedecerá ao item 5.4, com exceção do fato de o recipiente não estar preenchido com água (jato livre).

6 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão apresentados os resultados, obtidos a partir dos testes de laboratório com o banco de ensaios apresentado no Capítulo 5, realizados no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Em seguida, é feita a análise dos resultados.

6.1 RESULTADOS

6.1.1 RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE DOS ENSAIOS

Utilizando o método de ensaio descrito no item 5.4, o estudo foi dividido em duas fases. Na primeira fase dos ensaios, de calibração do equipamento, foi verificado o efeito de diferentes tamanhos de diâmetros de orifícios nos testes e avaliou-se, também, o efeito da distância entre o bocal e a amostra. Em seguida, tendo sido definida a distância em que se verificavam os maiores danos, diferentes bocais de diferentes geometrias foram testados.

O ataque por cavitação pode ser analisado em termos de tamanho e número de “pits” por unidade de tempo para obter informações quantitativa e qualitativa a respeito da variação da intensidade da cavitação com a velocidade de escoamento. Amostras de alumínio são, geralmente, escolhidas para uso em testes com a finalidade de verificar o “pitting”, pois qualquer implosão intensa o suficiente para danificar o material, produz uma deformação permanente neste material.

Tullis (1989) comenta que para a avaliação de danos de cavitação incipientes, amostras de alumínio polidas, sem imperfeições na sua superfície, podem ser usadas. O tamanho e a

posição da amostra dependem do tamanho e tipo de equipamento testado. O sistema é operado por um intervalo determinado de tempo, as amostras removidas, inspecionadas e a contagem de “pits” é feita. O dano incipiente pode ser definido com uma taxa de “pitting” de 1 pit/in²/min (aproximadamente 2,6x10⁻³ pits/cm²/s, segundo o autor). Em vista do exposto, amostras de alumínio polidas foram utilizadas para calibração do equipamento tipo jato cavitante deste trabalho.

Na segunda etapa, definidos os valores do diâmetro do orifício e distância ótima, utilizando-se as geometrias de bocais que causaram os maiores desgastes no alumínio, foram ensaiadas amostras de concreto de diferentes composições.

De acordo com Lichtarowicz (1979) o equipamento tipo jato cavitante simula a erosão por cavitação em um tempo de teste curto. Isso ocorre devido, principalmente, a magnitude de velocidade que é da ordem de 100 m/s. O autor 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. No item 3.2, foi apresentado um parâmetro que representasse o fenômeno da cavitação. O parâmetro ou índice de cavitação é definido pela Equação (3.5).

$$\sigma = \frac{p_o - p_v}{\rho v_o^2 / 2}, \text{ sendo:} \quad (3.5)$$

p_o : pressão absoluta no centro do jato;

p_v : pressão de vapor absoluta;

v_o : velocidade no centro do jato;

ρ : massa específica.

Considerando-se a leitura média da temperatura da água obtida nos ensaios de 26° C, resultou:

p_v : 3250 Pa;

ρ : 997 Kg/m³.

Iniciaram-se os ensaios com o bocal cônico de 20°, com cantos em arestas vivas e diâmetro de orifício de 3 mm. Para este diâmetro, obteve-se, a partir da leitura do transdutor de pressão, o valor de 2,5 MPa e vazão de $4,33 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Considerando-se a velocidade do jato de 61,26 m/s, obtém-se o valor de σ igual a 0,33. De maneira a se obter tempos menores de ensaios e considerando-se que Falvey (1990) apresenta um valor de σ da ordem de 0,15 para o qual ocorrem danos severos nas estruturas hidráulicas, prosseguiram-se os ensaios com o orifício de diâmetro 2 mm.

Com o uso do diâmetro de 2 mm, obtiveram-se leituras de pressão absoluta de até 14,0 MPa. Foi adotado um valor de pressão de referência máxima no transdutor de 12,8 MPa para realização dos ensaios, pois este valor está próximo a máxima pressão de operação da bomba. Nesta condição, tem-se uma vazão de $4,707 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Calculando-se o valor da velocidade do jato de 149,83 m/s, resulta em um índice de cavitação σ igual a 0,14. Tomando-se como referência o valor do índice de cavitação de 0,15, citado por Falvey (1990) para os testes, o índice de 0,14 obtido pode ser considerado adequado para os ensaios de cavitação em concreto. No caso deste trabalho experimental, ademais, como não se deseja cortar as amostras, resolveu-se não modificar o diâmetro do orifício. Verifica-se que em estudos com jatos rápidos, como os de Leach e Walker (1966) e Conn et al (1984), o objetivo era cortar as amostras. Assim maiores valores de pressões a montante dos bocais e menores diâmetros de orifícios eram utilizados.

Para poder se estabelecer parâmetros de comparação de outros equipamentos com o equipamento desenvolvido neste trabalho foi calculado primeiramente, o valor do número de Mach. Sendo o diâmetro do orifício igual a 2 mm, a velocidade do jato de 149,83 m/s e, adotando para a celeridade o valor conservador de 1496 m/s, pela Equação (3.6) encontra-se $M_a = 0,1$, ou seja, o fluido pode ser considerado como incompressível.

De acordo com Boehm, Stoffel e Ludwig (1997) as características de escoamentos não cavitantes, por exemplo, as distribuições de pressões, o tipo de camada limite e a separação do escoamento também têm influência no comportamento da cavitação para números de Reynolds equivalentes.

A partir da Equação (3.7), obtém-se o valor do número de Reynolds nos ensaios igual a $3,3 \times 10^5$, adotando para a viscosidade cinemática da água a 26°C , $0,897 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e velocidade do jato igual a $149,83 \text{ m/s}$, considerando o diâmetro de orifício de 2 mm . Esse valor do número de Reynolds corresponde ao regime turbulento.

Leach e Walker (1966) citam que o nível de turbulência na saída do bocal é afetado pela aspereza da parede interna do bocal. Logo, conhecendo-se o valor de Reynolds, pode-se determinar o comprimento do desenvolvimento da camada limite no trecho que precede a saída do bocal e compará-lo com a rugosidade do aço inoxidável. Como foi verificado que o escoamento é turbulento, a partir da Equação (3.11) obtém-se a relação L_e/D igual a $36,65$. Da geometria do bocal, tem-se a relação l/D igual a $1,85$ (observar Figura 5.3). Este valor é muito menor que a região de desenvolvimento da camada limite.

Considerando-se que, caso houvesse um trecho retilíneo que precedesse a saída do bocal, de comprimento pelo menos igual a L_e (comprimento do desenvolvimento da camada limite), ter-se ia a espessura da camada limite, nesta seção, igual a $D/2$. Logo, para um trecho retilíneo de comprimento $l=1,85D$, ou seja, na saída do bocal confeccionado, estima-se a espessura da camada limite laminar em $5,05 \times 10^{-2} \text{ mm}$. O valor da rugosidade (ϵ) para o aço inoxidável novo é de $2,00 \times 10^{-3} \text{ mm}$, de acordo com White (2002) e, portanto, menor que a espessura da camada limite laminar. Pode-se considerar, então, que a rugosidade do bocal não afeta o escoamento na saída do mesmo.

Finalmente, usando-se o valor de $7,27 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ para tensão superficial da água a 26°C , calcula-se $W_e = 6,2 \times 10^5$, valor suficientemente alto para ignorar-se o efeito da tensão superficial da água nos testes.

6.1.1.1 DISTÂNCIA ENTRE O BOCAL E A AMOSTRA

No Quadro 6.1 apresentam-se as taxas de erosão das amostras de alumínio, liga 6351T6V0, obtidas nos diferentes tempos de testes (1 min, 2 min, 3 min, 4 min, 5 min, 20 min) nas três diferentes distâncias utilizadas (0,05 m, 0,10 m e 0,15 m) com o bocal cônico de 20° e arestas vivas. Em seguida, na Figura 6.1 pode ser visualizada a evolução das taxas de erosão das

amostras de alumínio para os diferentes tempos de ensaios e distâncias utilizadas. Os valores de desgaste foram determinados fazendo-se a contagem de “pits” na superfície da amostra de alumínio polida para os diferentes tempos de ensaios e diferentes distâncias. Foi utilizada, para tanto, lupa de aumento binocular de 160x.

Deve-se ressaltar que os gráficos e tabelas apresentados neste capítulo são meramente ilustrativos da evolução do desgaste, não tendo o intuito de apresentar um método de previsão de erosão por cavitação.

Quadro 6.1. Desgastes nas amostras de alumínio.

| Distância | Desgaste (pits/cm ²) | | | | | | Equação de ajuste | R ² |
|-----------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|----------------------|----------------|
| | Tempo (min) | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 20 | | |
| 5 cm | 30.30 | 25.89 | 28.92 | 89.79 | 81.53 | 118.23 | Y=34,187ln(x)+18,096 | 0,7690 |
| 10 cm | 26.89 | 31.79 | 33.88 | 37.03 | 53.27 | 64.45 | Y=13,508ln(x)+23,696 | 0,8819 |
| 15cm | 17.32 | 4.80 | 5.86 | 8.42 | 9.46 | 18.00 | Y=1,5234ln(x)+8,6673 | 0,0727 |

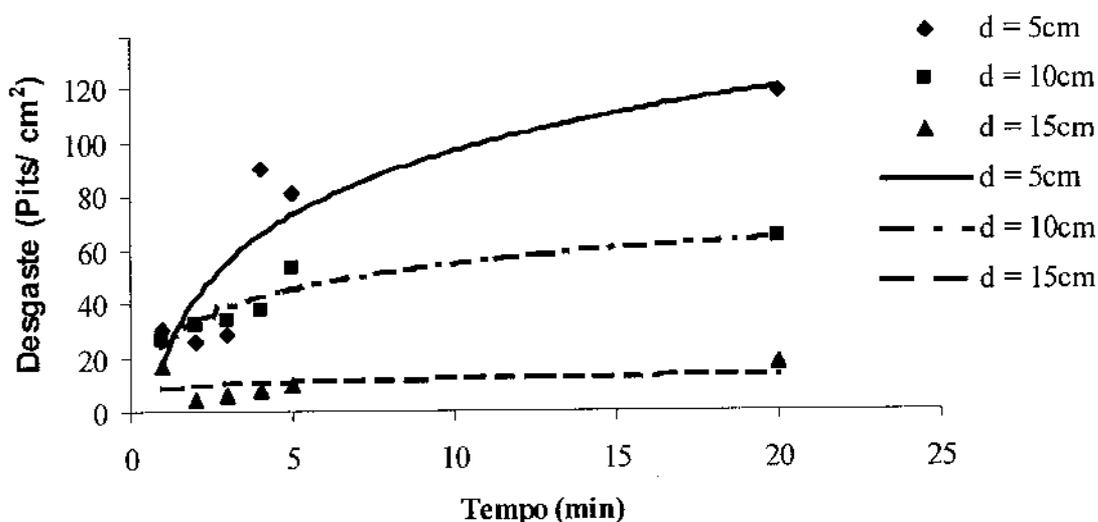


Figura 6.1. Evolução das taxas de erosão às distâncias de 0,05 m, 0,10 m e 0,15 m.

Na Foto 6.1 podem-se verificar os danos sofridos pelas amostras de alumínio para o tempo de ensaio de 20 minutos, respectivamente, às distâncias 0,05 m, 0,10 m, e 0,15 m. Deve ser salientado que as fotos foram feitas acoplando-se uma câmara à lupa binocular. Contudo, a lupa que permitia esse acoplamento no laboratório tem capacidade de aumento 100x, ou seja,

possui um aumento menor que a utilizada para contagem do dano. Além disso, a iluminação do equipamento foi deficiente para obter-se melhor qualidade das fotos dos ensaios.

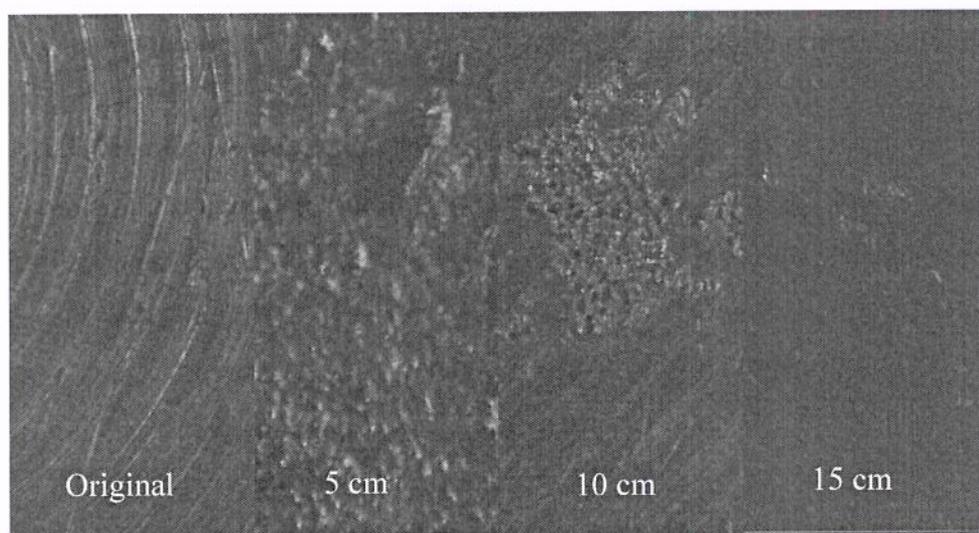


Foto 6.1. Erosão de cavitação em amostras de alumínio (aumento de 100x).

A análise visual das amostras para todos os diferentes tempos de ensaios corrobora que o desgaste sofrido à distância de 0,05 m nas amostras de alumínio foi muito superior ao obtido com as demais distâncias. Para a distância de 0,15 m entre o bocal e o alvo (amostra) o desgaste foi muito pequeno, sendo visualizado, para os primeiros tempos de ensaios, apenas através da lupa, ou seja, a olho nu, nada era verificado. Essa discrepância entre os valores contados e o que pode ser visualizado a olho nu é devido ao fato de que nas amostras que sofreram maiores desgastes havia maior dificuldade em se realizar a contagem, pois, uma vez iniciado o dano, há uma concentração cada vez maior de “pits” na região. Por outro lado, nas que menos desgastes sofriam os “pits”, mais isolados, favoreciam a contagem mais precisa (ver Foto 6.1). Verifica-se, a partir dos resultados, que a distância em que se obteve os maiores danos foi de 0,05m.

Nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 observam-se os valores capturados de impacto do jato. O trecho crescente de impacto no início dos testes e o trecho decrescente de impacto no fim dos testes, referem-se ao ligamento e desligamento da instalação. Assim, no período efetivo dos ensaios, percebe-se que não houve variação significativa do impacto para as três diferentes distâncias. Pode-se considerar o dano advindo principalmente pela ação da cavitação, pois o

impacto manteve-se praticamente constante, mesmo variando a distância entre o bocal e a amostra.

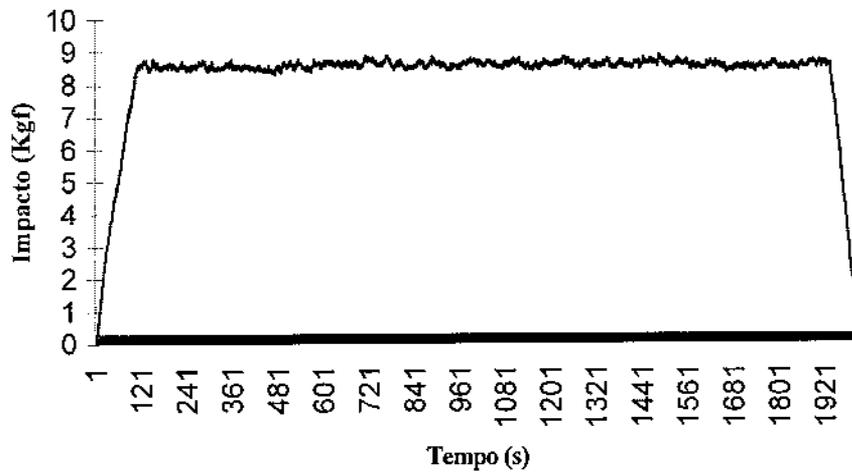


Figura 6.2. Impacto registrado pela célula de carga à distância de 0,05 m.

Leach e Walker (1966) observaram a ação do impacto de um jato d'água de alta velocidade sobre um alvo conectado a um transdutor de pressão. Foram registrados valores de pressão a montante do bocal e no alvo. Não foram realizados ensaios de desgastes de amostras. Os autores observaram que a pressão registrada no alvo para uma distância de até 100 vezes o valor do diâmetro do bocal foi mais de 80% da pressão registrada a montante dos mesmos.

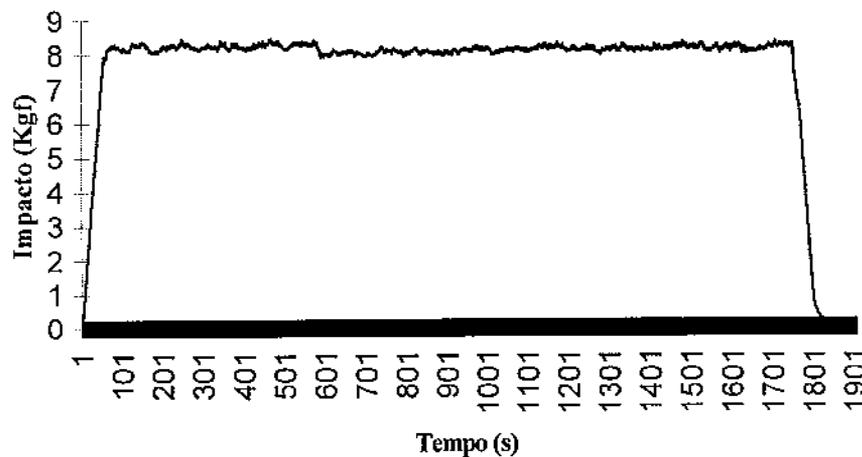


Figura 6.3. Impacto registrado pela célula de carga à distância de 0,10 m.

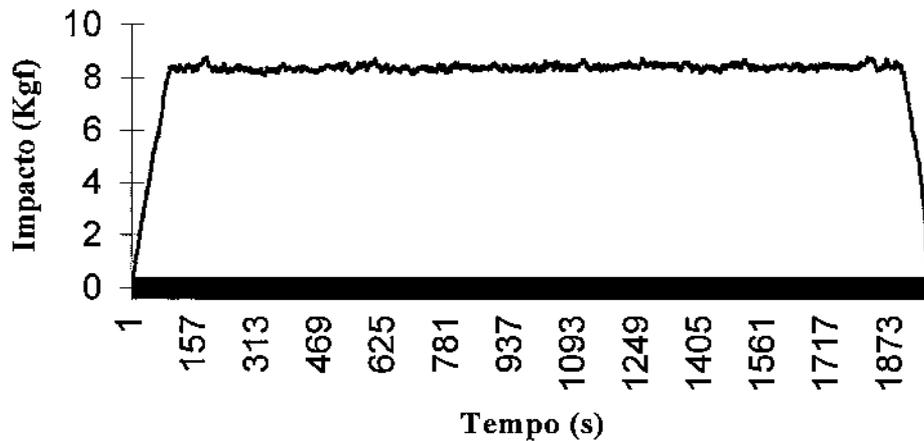


Figura 6.4. Impacto registrado pela célula de carga à distância de 0,15 m.

Houlston e Vickers (1978) 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, segundo os autores, nem toda evidência experimental corrobora a idéia de que a erosão devida à cavitação de um jato fosse maior que uma obtida a uma distância maior (menos crítica), aonde o jato se ‘romperia’ em distintas gotículas do líquido. De acordo com Tullis (1989), se as cavidades preenchidas com vapor são transportadas até uma fronteira sólida antes do seu colapso podem ocorrer danos. Pesquisas realizadas em laboratório indicam que a implosão das cavidades deve ocorrer, aproximadamente, a uma distância de um diâmetro das bolhas até a superfície de maneira a causar danos no material.

As constatações de Tullis (1989) corroboram os resultados obtidos neste trabalho experimental. Constata-se experimentalmente que, para se conseguir maiores taxas de erosão em diferentes amostras de concreto, utilizando-se o equipamento tipo jato cavitante, menores distâncias ao alvo, como a de 0,05 m aqui utilizada, são preferíveis.

6.1.1.2 TIPOS DE BOCAIS

Tendo-se definido a distância, foram iniciados os ensaios com diferentes bocais de aço inox (cônico de 20°, cônico de 132°, circular de raio 12,5 mm e MEG2510), conforme apresentado no item 5.4.1. Devido à inexistência de um modelo matemático satisfatório que

análise o perfil de velocidades desejável para uma mínima dispersão do jato, os valores experimentais obtidos para a variedade de bocais empregados podem ser utilizados. Foram empregados para este trabalho, bocais de diferentes geometrias, como se observa na Figura 5.3. Os bocais têm pequenos comprimentos, seja na região da contração como no trecho retilíneo que segue à região da contração, de maneira a evitar-se maiores perdas de carga. Leach e Walker (1966) verificaram bom desempenho para os bocais com a relação L/D (ver Figura 5.3) entre 2 e 4. Uma relação L/D de 1,85 foi utilizada para comparar-se as eficiências obtidas com as do trabalho de Houlston e Vickers (1978).

Os bocais cônico de 20° , cônico de 132° e circular de raio 12,5 mm foram confeccionados com saída entre a contração e o trecho reto em arestas vivas e arestas chanfradas. O bocal MEG2510 foi adquirido de empresa especializada em fabricação de bocais para altas pressões. Foram também ensaiados dois bocais para este modelo, sendo considerado o resultado a média dos resultados individuais. Também, deve-se ressaltar a presença de uma textura levemente mais rugosa no interior dos bocais cônicos de 20° , pois o processo de confecção foi diferente dos demais.

Nos Quadros 6.2 (a) e (b), encontram-se apresentados os desgastes das amostras de alumínio, obtidos para os diferentes bocais, respectivamente, em arestas vivas e em arestas chanfradas, no tempo final dos testes.

Quadro 6.2 (a). Desgaste das amostras de alumínio com o emprego dos bocais em arestas vivas.

| Bocal | Desgaste (pits/cm ²) | | | | | | Equação de ajuste | R ² |
|----------------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|----------------|
| | Tempo (min) | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 20 | | |
| Cônico de 20° | 38.56 | 38.56 | 46.00 | 99.16 | 90.13 | 154.77 | Y=42,818ln(x)+22,321 | 0,8763 |
| Cônico de 132° | 59.31 | 78.70 | 80.57 | 128.60 | 151.16 | 430.25 | Y=127,81ln(x)-11,037 | 0,8552 |
| Circular | 755.99 | 251.89 | 163.23 | 110.77 | 171.38 | 330.92 | Y=61,282ln(x)+108,53 | 0,8476 |
| MEG2510 | 10.19 | 29.74 | 34.63 | 46.86 | 51.34 | 58.67 | Y=16,11ln(x)+17,672 | 0,8587 |

Nas Figuras 6.5 (a) e (b) são traçadas as curvas de desgaste pelos diferentes tempos de ensaios, para os diferentes bocais empregados, respectivamente com arestas vivas e arestas

chanfradas. Novamente, para determinar os desgastes, procedeu-se a contagem de “pits” para os tempos dos ensaios, utilizando a lupa binocular de aumento 160x.

Quadro 6.2 (b). Desgaste das amostras de alumínio com o emprego dos bocais em arestas chanfradas.

| Bocal | Desgaste (pits/cm ²) | | | | | | Equação de ajuste | R ² |
|-----------------------|----------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|---------------------|----------------|
| | Tempo (min) | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 20 | | |
| Cônico de 20° | 397.89 | 78.12 | 84.25 | 86.43 | 111.79 | 113.03 | Y=20,837ln(x)+60,24 | 0,8025 |
| Cônico de 132° | 12.46 | 19.24 | 40.41 | 51.94 | 102.70 | 63.09 | Y=21,281ln(x)+20,70 | 0,4272 |
| Circular | 49.80 | 65.23 | 95.10 | 103.55 | 113.93 | 113.07 | Y=22,446ln(x)+60,99 | 0,7218 |
| MEG2510 | 10.19 | 29.74 | 34.63 | 46.86 | 51.34 | 58.67 | Y=16,11ln(x)+17,672 | 0,8587 |

Deve-se destacar que a discrepância entre os valores contados nos diferentes tempos de testes e para os diferentes bocais, como pode ser verificado para o tempo de 1 min para o bocal cônico de 20°, em arestas chanfradas, é devido ao fato de que nas amostras que sofreram maiores desgastes havia maior dificuldade em se realizar a contagem, pois, uma vez iniciado o dano, há uma concentração cada vez maior de “pits” na região. Por outro lado, no início dos testes e nas amostras que menos desgastes sofriam os “pits”, mais isolados, favoreciam a contagem mais precisa. Contudo, os resultados apresentados refletem a tendência de erosão observada em Laboratório.

A partir dos resultados obtidos nesta fase de ensaios, observa-se que os maiores danos, em ordem decrescente, são obtidos com o emprego dos bocais cônico de 132°, circular de raio 12,5 mm e cônico de 20°, em arestas vivas. O bocal MEG2510, único adquirido comercialmente, para o qual, além da presença da vane, não se tem a especificação da forma interna, apresentou os piores resultados, abaixo dos obtidos com os outros bocais testados, sejam em arestas vivas ou chanfradas.

Leach e Walker (1966) obtiveram melhores resultados de desempenho do jato rápido para bocais cônicos entre 13° e 20° que para bocais cônicos entre 30° e 45°, a partir da leitura das pressões desenvolvidas de impacto no alvo. Também, foram verificados bons resultados para uma geometria curva com ângulo de abertura de 30°, obviamente, para as mesmas condições de

ensaios. Resultados levemente melhores foram verificados para arestas em cantos vivos, que em cantos arredondados. Houlston e Vickers (1978) obtiveram melhores resultados para a erosão de cavitação com os bocais cônicos de 112° e logarítmico que para um bocal cônico de 40°. Pela análise destes trabalhos, verifica-se que Leach e Walker (1966) não consideraram o efeito da cavitação nos ensaios, apenas o desenvolvimento de um jato de alta velocidade. Assim, bocais com ângulos de abertura obtusos para o caso da simulação de ensaios de erosão por cavitação são preferíveis.

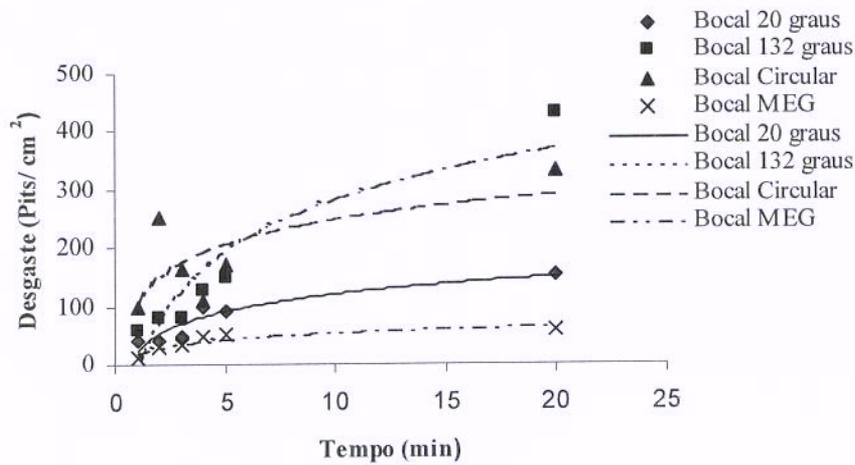


Figura 6.5 (a). Desgaste das amostras de alumínio com o emprego dos bocais em arestas vivas.

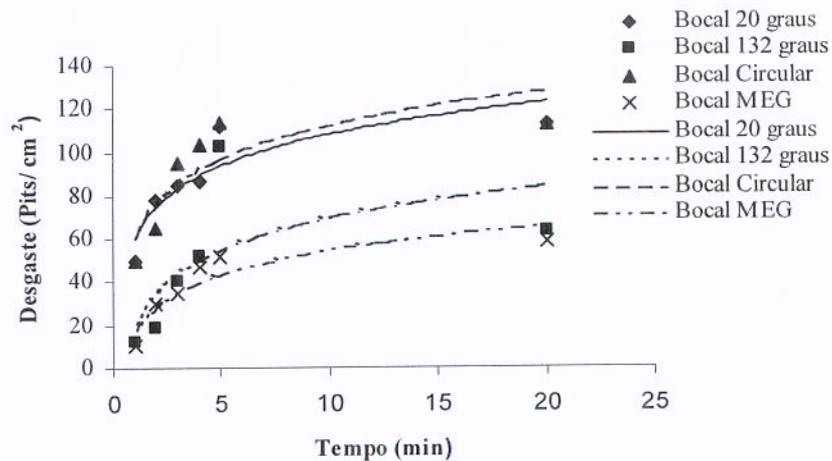


Figura 6.5 (b). Desgaste das amostras de alumínio com o emprego dos bocais em arestas chanfradas.

Na Foto 6.2, pode-se visualizar a evolução do desgaste da amostra de alumínio nos diferentes tempos de ensaios, usando o bocal circular.

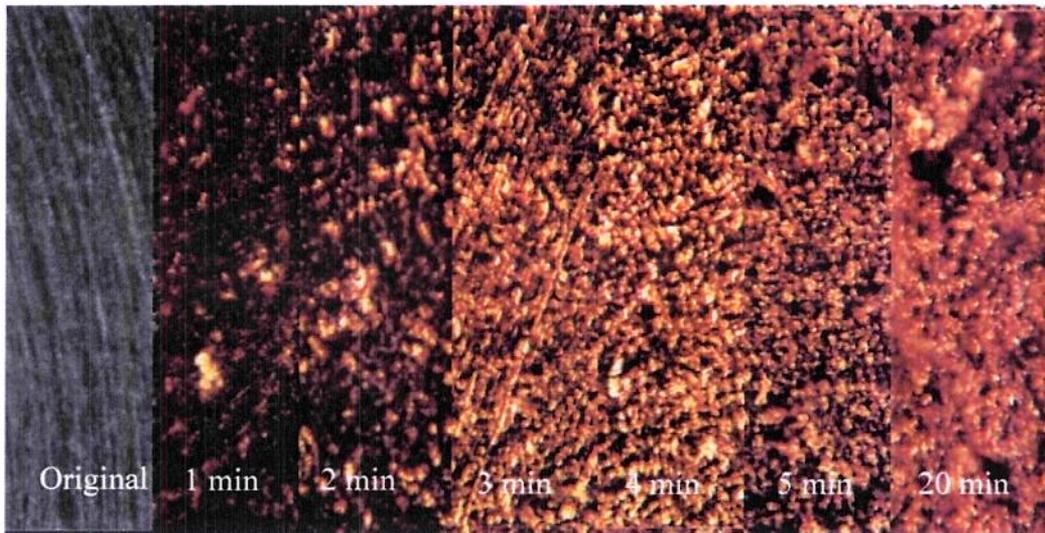


Foto 6.2. Evolução dos danos em amostra de alumínio - aumento 100x.

Na Foto 6.3 observa-se o desgaste na amostra de alumínio, no final dos testes utilizando-se o bocal circular, da esquerda (borda - região menos afetada) para a direita (centro da amostra - região mais afetada).



Foto 6.3. Efeito da cavitação, em amostra de alumínio.

6.1.2 RESULTADOS DA SEGUNDA FASE DOS ENSAIOS

A partir dos resultados obtidos na primeira fase dos ensaios, utilizando-se os bocais cônico de 20°, cônico de 132°, e circular, em arestas vivas procederam-se aos ensaios de concretos com as amostras indicadas no Quadro 5.2. No caso dos ensaios com corpos de prova de concreto, verifica-se, a partir do segundo minuto, dificuldade na contagem de “pits”, devido à alteração significativa da superfície, com uma aglomeração muito grande de “pits”, e início do aprofundamento da área erodida. Tal fato pode ser verificado nas Fotos 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7. Nas Fotos 6.4 e 6.5 são visualizadas as evoluções dos danos nas amostras B e C, respectivamente, com o uso do bocal cônico de 132°. Nas Fotos 6.6 e 6.7 são mostradas as evoluções dos danos nas amostras B e C, respectivamente, com o uso do bocal circular. É importante ressaltar que foi preparado um local para fotografar as amostras. A máquina digital utilizada para as fotos foi fixada sobre um tripé, mantendo-se fixa a distância entre a câmera e a amostra. Assim, as amostras eram posicionadas sempre na mesma posição.

Como, no caso dos concretos, a contagem de “pits” mostra-se adequada apenas para os instantes iniciais dos ensaios à cavitação, pois este método avalia apenas a resistência da pasta, outros parâmetros que quantifiquem a erosão por cavitação em concretos são necessários. A perda de peso, no caso de erosão é normalmente calculada depois de determinado número de horas de funcionamento, assim como a profundidade da erosão. Porém, a perda de peso, especialmente no caso de se utilizar tempos de ensaios curtos e tamanhos de amostras mais reduzidas, porém representativas do material heterogêneo, são válidos apenas se, as amostras atingem a fase de erosão estável, de acordo com Gikas (1980). Também, deve-se dispor, em laboratório, de uma balança de precisão coerente com a perda do material, que será menor, uma vez que as amostras e os períodos de ensaios também o são. A profundidade de erosão, no caso dos concretos, pode levar a conclusões errôneas, se utilizado como único parâmetro. Como observado durante os testes deste trabalho, apesar da erosão aumentar, a profundidade, algumas vezes não se alterava, até que os agregados graúdos fossem retirados do corpo de prova. Assim, deve-se levar em consideração, também, a área erodida da amostra.

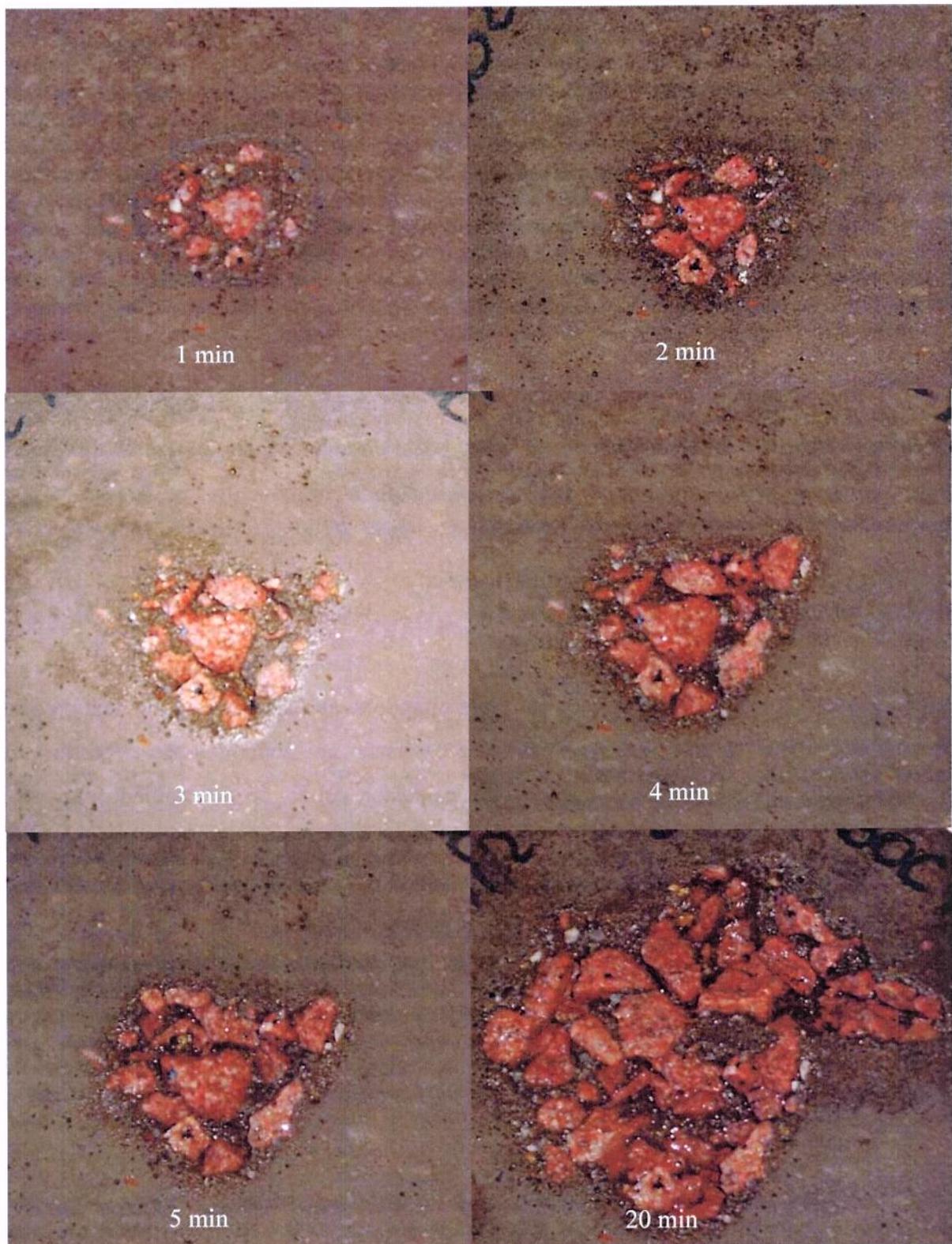


Foto 6.4. Evolução da erosão na amostra de concreto B (bocal cônico de 132°).

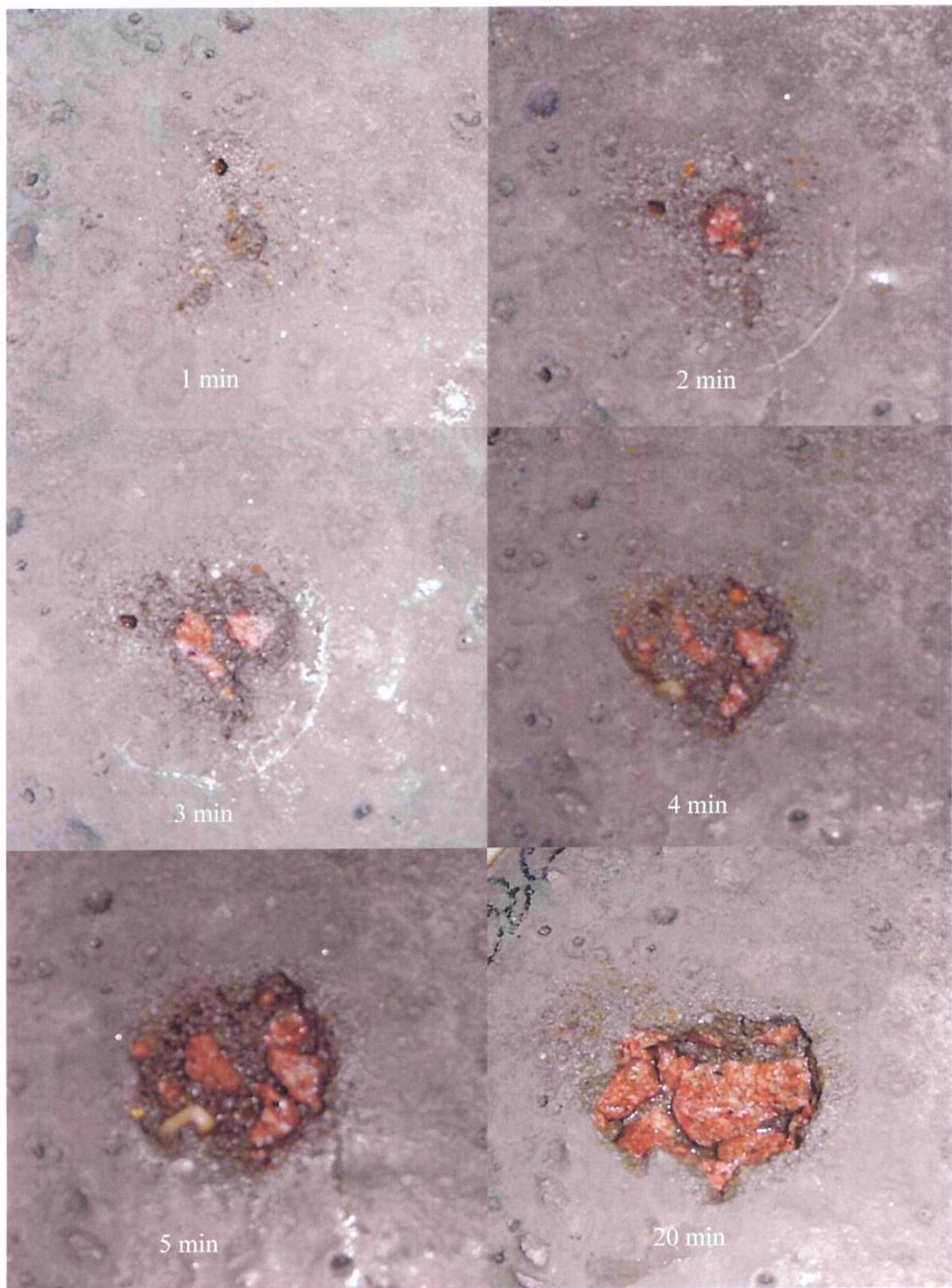


Foto 6.5. Evolução da erosão na amostra de concreto C (bocal cônico de 132°).

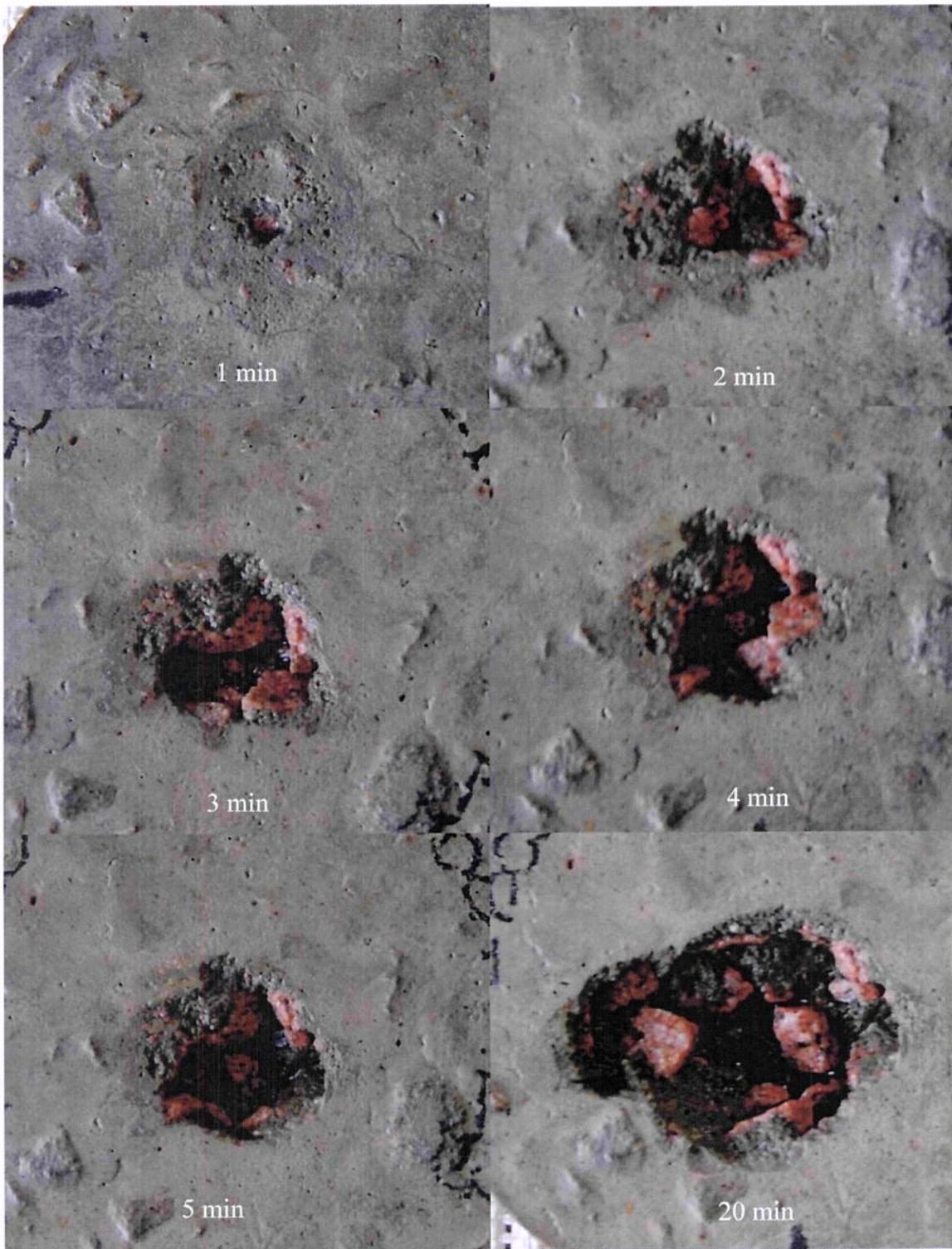


Foto 6.6. Evolução da erosão na amostra de concreto B, com o uso do bocal circular.

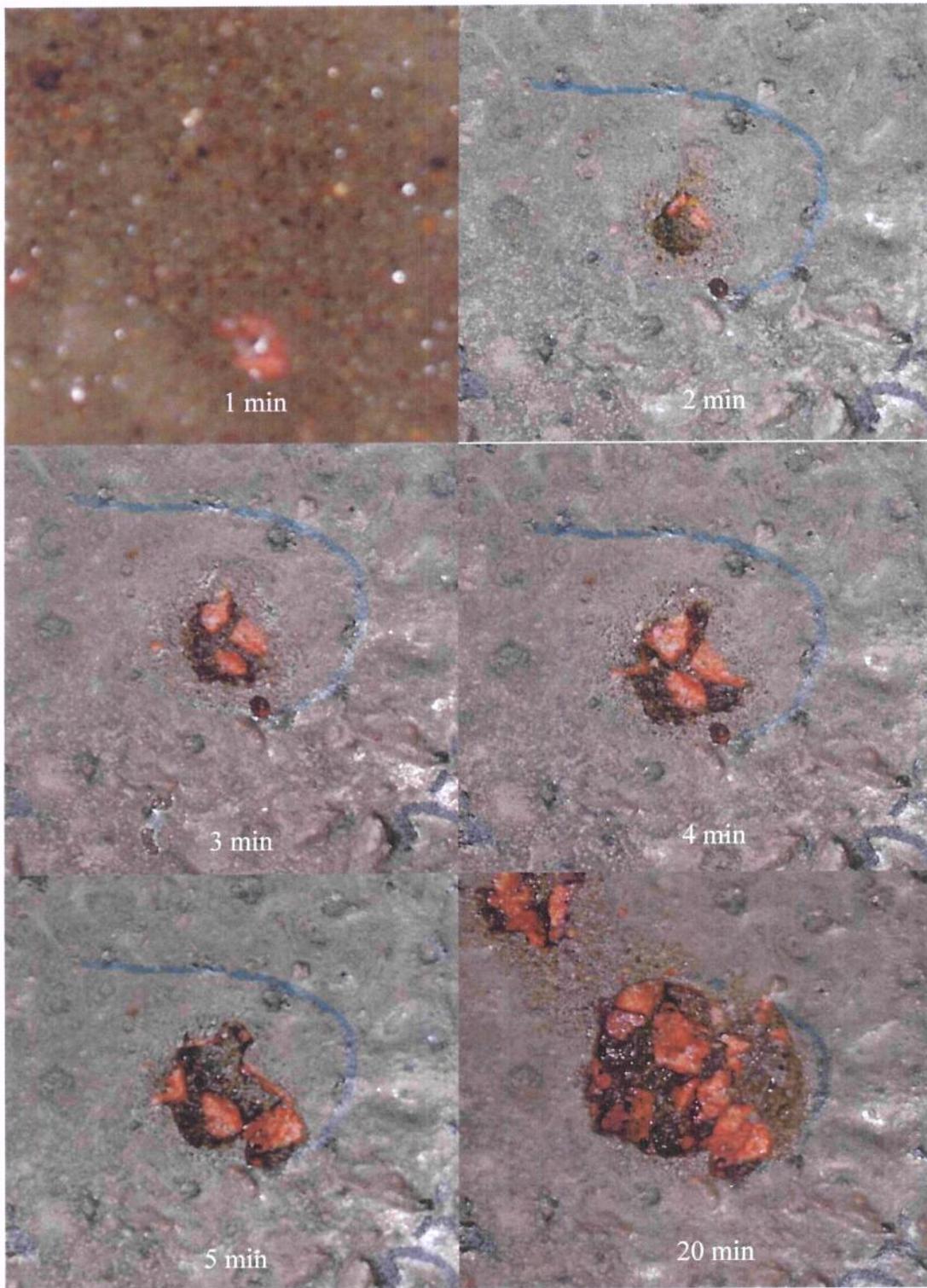


Foto 6.7. Evolução da erosão na amostra de concreto C, com o uso do bocal circular.

Como não se dispunha em laboratório de balança para medição da perda de peso suficiente para uma amostra de mais de 1,5 Kg e que fosse capaz de registrar perdas de algumas gramas entre um minuto e outro, como no caso da amostra C, foi estimado o volume de material retirado, a cada tempo de ensaio. Media-se a profundidade com o paquímetro, em três pontos diferentes da erosão, e considerava-se o valor da profundidade média. Também, verificava-se o diâmetro médio da erosão (estimativa da área do dano). Logo, sugere-se como parâmetro de quantificação da evolução da taxa de erosão e da resistência do material, o volume de material retirado e a profundidade média da erosão.

Nos Quadros 6.3 (a), (b) e (c), encontram-se, respectivamente, os valores de desgaste sofridos pela amostra A (composta de agregado calcário), amostra B (agregado granito, sem adição) e amostra C (agregado granito com adição de sílica ativa) nos diferentes tempos de testes, com uso dos bocais cônicos de 20°, cônico de 132° e circular.

Deve-se ressaltar que os gráficos e tabelas apresentados neste capítulo são meramente ilustrativos da evolução do desgaste, não tendo o intuito de apresentar um método de previsão de erosão por cavitação. Para o emprego de concreto resistente nas estruturas hidráulicas são necessários ensaios de laboratório.

Quadro 6.3 (a). Danos na amostra de concreto A.

| Bocal | Desgaste (cm ³) | | | | | | Equação de ajuste | R ² |
|----------------|-----------------------------|------|------|------|------|-------|----------------------|----------------|
| | Tempo (min) | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 20 | | |
| Cônico de 20° | 0.33 | 0.82 | 1.41 | 3.14 | 4.56 | 6.65 | Y=2,324ln(x)-0,1972 | 0,9134 |
| Cônico de 132° | 0.16 | 0.32 | 1.15 | 2.57 | 5.15 | 42.35 | Y=14,047ln(x)-10,071 | 0,7621 |
| Circular | 0.08 | 0.19 | 1.03 | 1.16 | 2.06 | 14.30 | Y=4,8474ln(x)-3,1524 | 0,7837 |

Quadro 6.3 (b). Danos na amostra de concreto B.

| Bocal | Desgaste (cm ³) | | | | | | Equação de ajuste | R ² |
|----------------|-----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|----------------------|----------------|
| | Tempo (min) | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 20 | | |
| Cônico de 20° | 0.23 | 0.84 | 1.05 | 1.34 | 2.88 | 22.70 | Y=7,5946ln(x)-5,0134 | 0,7574 |
| Cônico de 132° | 4.98 | 7.86 | 12.74 | 14.07 | 28.40 | 89.22 | Y=29,135ln(x)-11,581 | 0,8465 |
| Circular | 0.80 | 4.26 | 7.80 | 13.99 | 16.02 | 49.80 | Y=16,873ln(x)-6,4428 | 0,9146 |

Quadro 6.3 (c). Danos na amostra de concreto C.

| Bocal | Desgaste (cm ³) | | | | | | Equação de ajuste | R ² |
|----------------|-----------------------------|------|------|------|------|-------|-------------------------|----------------|
| | Tempo (min) | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 20 | | |
| Cônico de 20° | 0.08 | 0.15 | 0.45 | 0.45 | 0.54 | 5.95 | $Y=1,9751\ln(x)-1,2924$ | 0,8428 |
| Cônico de 132° | 0.10 | 0.54 | 1.44 | 4.85 | 6.20 | 18.78 | $Y=6,608\ln(x)-3,247$ | 0,7075 |
| Circular | 0.31 | 0.93 | 1.23 | 3.98 | 4.31 | 19.28 | $Y=6,5467\ln(x)-3,4892$ | 0,7492 |

Nas Figuras 6.6 (a), 6.6 (b) e 6.6 (c) são apresentadas as evoluções dos desgastes sofridos por cada amostra, respectivamente, A, B e C, utilizando-se os três diferentes tipos de geometria de bocal, nos diferentes tempos de testes. Seguindo-se cada gráfico, visualiza-se o aspecto das amostras de concreto A, B e C ao fim de cada teste, com o uso dos três diferentes bocais (ver Fotos 6.8, 6.9 e 6.10).

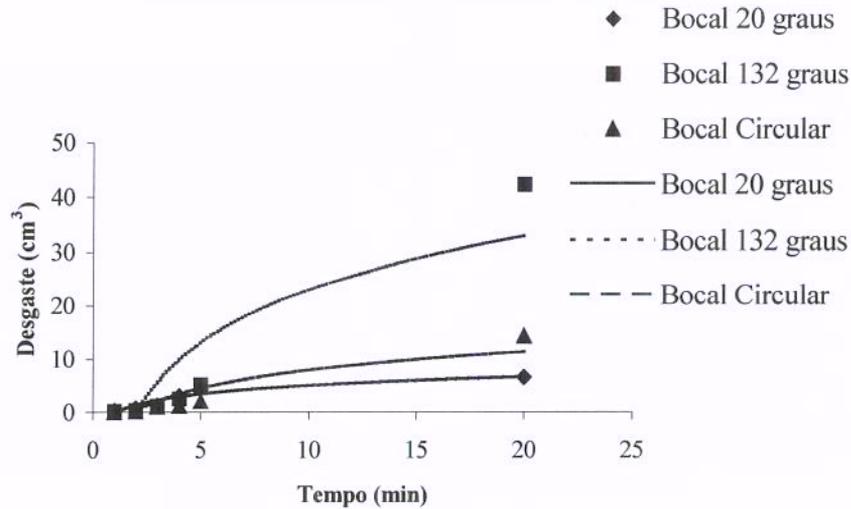


Figura 6.6 (a). Desgaste sofrido pela amostra A.



Foto 6.8. Dano em amostra de concreto.

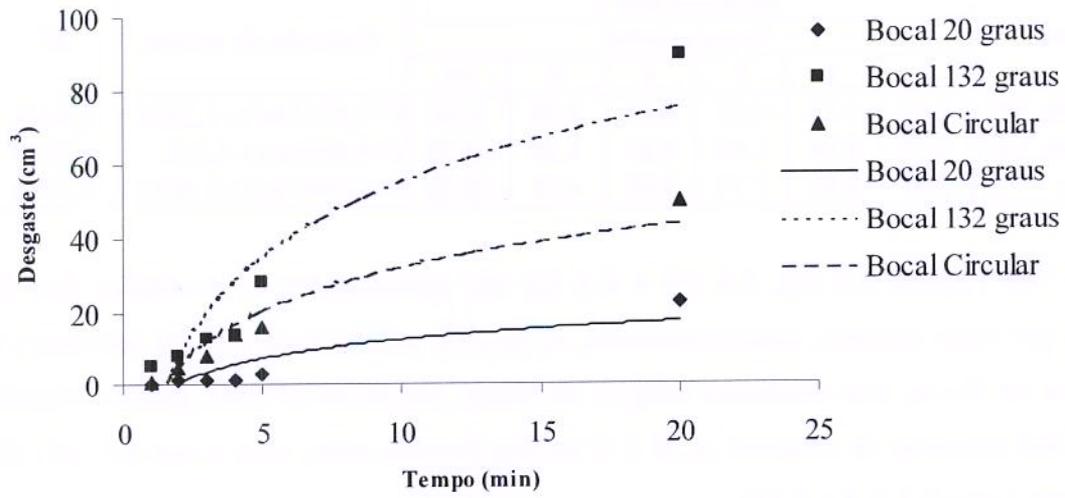


Figura 6.6 (b). Desgaste sofrido pela amostra B.



Foto 6.9. Dano em amostra de concreto.

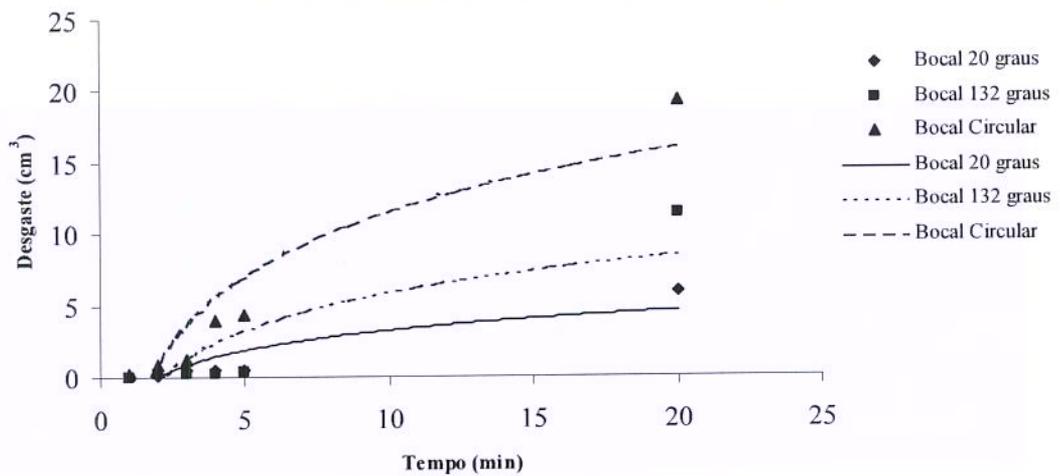


Figura 6.6 (c). Desgaste sofrido pela amostra C.



Foto 6.10. Dano em amostra de concreto.

Na Figura 6.7 (a) é apresentada a evolução do desgaste sofrido pelas amostras A, B e C, utilizando-se o bocal cônico de 20°. Na Figura 6.7 (b), apresenta-se o desgaste sofrido por cada amostra, com o uso do bocal cônico de 132°. Finalmente, na Figura 6.7 (c) observa-se o desgaste das três amostras com o uso do bocal circular.

Como dito anteriormente, a evolução das taxas de danos também foi expressa em função da profundidade de erosão. Nos Quadros 6.4 (a), (b) e (c), são apresentados os desgastes em função da profundidade nos diferentes tempos de ensaios e com o uso dos diferentes bocais, respectivamente, para as amostras A, B e C.

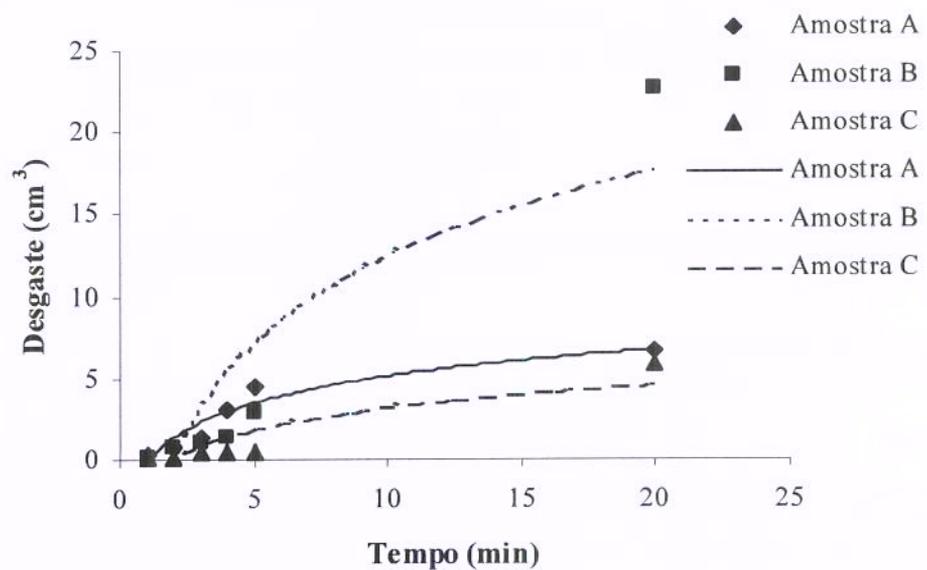


Figura 6.7 (a). Evolução do desgaste nas amostras A, B e C com o uso do bocal cônico de 20°.

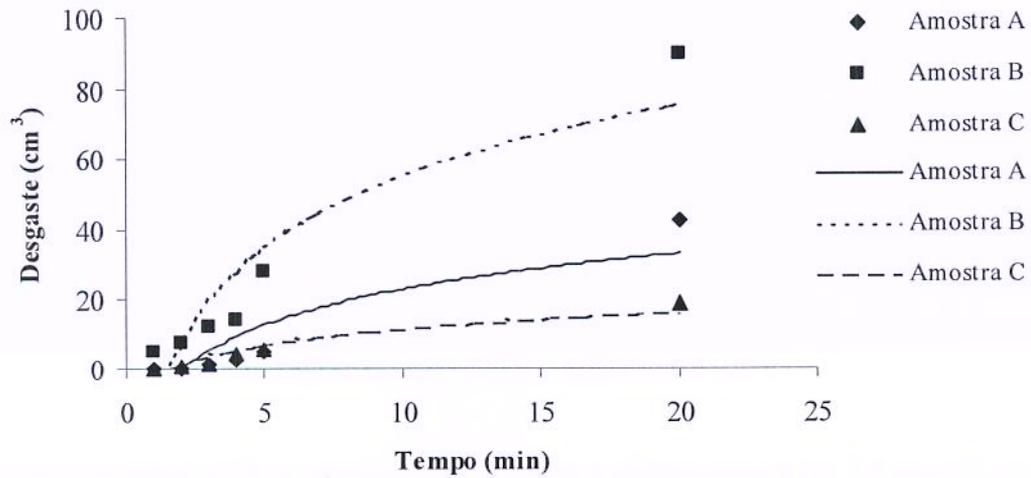


Figura 6.7 (b). Evolução do desgaste nas amostras A, B e C com o uso do bocal cônico de 132°.

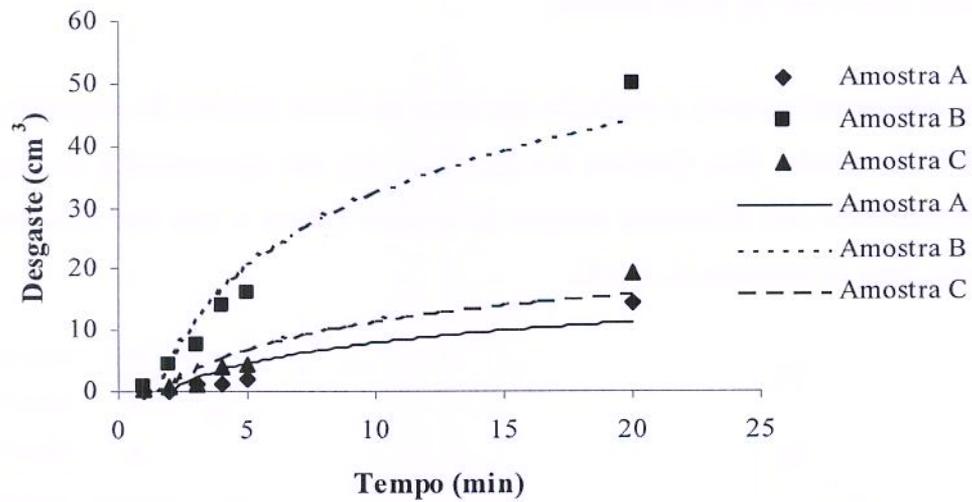


Figura 6.7 (c). Evolução do desgaste nas amostras A, B e C com o uso do bocal circular.

Quadro 6.4 (a). Profundidade de erosão na amostra A.

| Bocal | Desgaste (cm) | | | | | | Equação de ajuste | R ² |
|----------------|---------------|------|------|------|------|------|----------------------|----------------|
| | Tempo (min) | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 20 | | |
| Cônico de 20° | 0.34 | 0.38 | 0.45 | 0.55 | 0.58 | 0.79 | Y=0,1617ln(x)+0,3033 | 0,9646 |
| Cônico de 132° | 0.28 | 0.34 | 0.37 | 0.59 | 0.68 | 2.42 | Y=0,7346ln(x)-0,1735 | 0,8199 |
| Circular | 0.15 | 0.31 | 0.33 | 0.35 | 0.44 | 1.48 | Y=0,4394ln(x)-0,0605 | 0,8395 |

Quadro 6.4 (b). Profundidade de erosão na amostra B.

| Bocal | Desgaste (cm) | | | | | | Equação de ajuste | R ² |
|----------------|---------------|------|------|------|------|------|-------------------------|----------------|
| | Tempo (min) | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 20 | | |
| Cônico de 20° | 0.29 | 0.47 | 0.58 | 0.72 | 0.79 | 1.90 | $Y=0,5443\ln(x)+0,0831$ | 0,9187 |
| Cônico de 132° | 0.68 | 0.90 | 1.26 | 1.35 | 1.62 | 2.07 | $Y=0,4863\ln(x)+0,68$ | 0,9642 |
| Circular | 0.52 | 0.72 | 1.03 | 1.13 | 1.30 | 1.86 | $Y=0,4626\ln(x)+0,4922$ | 0,9861 |

Quadro 6.4 (c). Profundidade de erosão na amostra C.

| Bocal | Desgaste (cm) | | | | | | Equação de ajuste | R ² |
|----------------|---------------|------|------|------|------|------|-------------------------|----------------|
| | Tempo (min) | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 20 | | |
| Cônico de 20° | 0.10 | 0.14 | 0.48 | 0.31 | 0.36 | 0.76 | $Y=0,2194\ln(x)+0,0704$ | 0,8380 |
| Cônico de 132° | 0.15 | 0.38 | 0.36 | 0.49 | 0.58 | 1.49 | $Y=0,446\ln(x)-0,0026$ | 0,9069 |
| Circular | 0.31 | 0.37 | 0.37 | 0.58 | 0.62 | 1.66 | $Y=0,468\ln(x)+0,0435$ | 0,8497 |

Nas Figuras 6.8 (a), (b) e (c) observam-se os danos sofridos pelas amostras A, B e C em função da profundidade de erosão com a utilização, respectivamente, dos bocais cônico de 20°, cônico de 132° e circular.

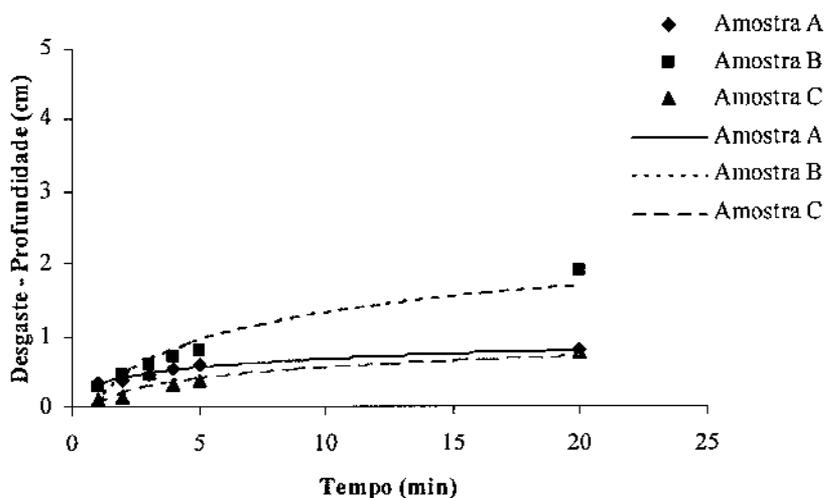


Figura 6.8 (a). Profundidade de erosão nas amostras A, B e C com o uso do bocal cônico de 20°.

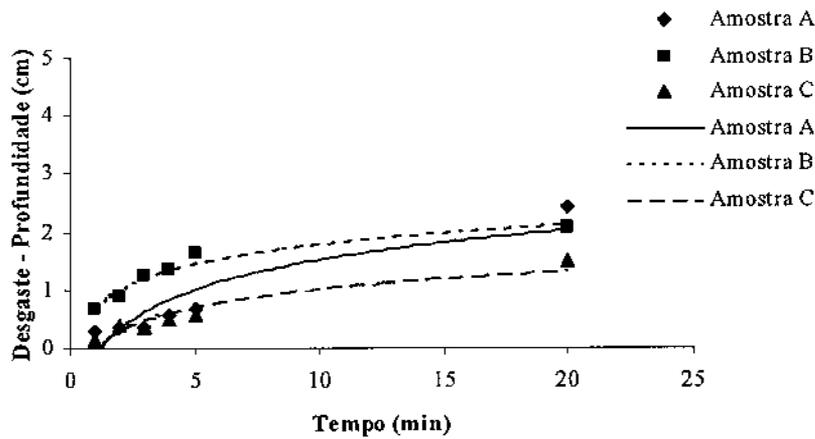


Figura 6.8 (b). Profundidade de erosão nas amostras A, B e C com o uso do bocal de 132°.

Verifica-se que o bocal que provocou os maiores desgastes nas amostras de concreto foi o cônico de 132° (Figuras 6.6 (a) e 6.6 (b)). Apenas no ensaio com a amostra C, o bocal circular provocou desgaste levemente maior que os demais bocais. (Figura 6.6 (c)). Observando-se a Figura 6.7 (b), notam-se taxas de erosão maiores com a utilização do bocal cônico de 132° do que com os demais bocais, comparando-se com as Figuras 6.7 (a) e (c).

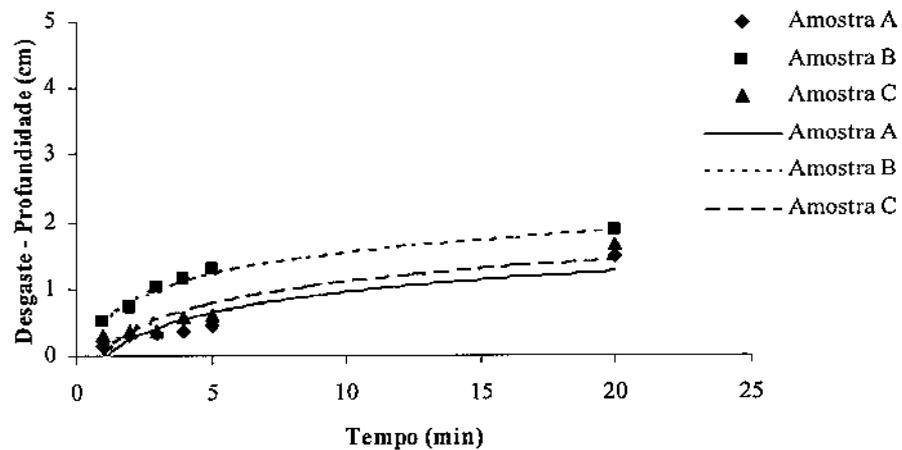


Figura 6.8 (c). Profundidade de erosão nas amostras A, B e C com o uso do bocal circular.

A amostra C apresentou o melhor desempenho face à ação erosiva da cavitação em todos os ensaios. Assim, adições como a de sílica ativa, usada na amostra C, são recomendáveis para melhorar o desempenho do concreto usado nas estruturas hidráulicas.

Cheng, Webster e Wong (1990) utilizaram, em seus testes, com o equipamento tipo jato cavitante, amostras de concreto, sem adição, com resistência à compressão axial de 41,55 MPa, ou seja, com resistência inferior às amostras ensaiadas no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos. Contudo, os corpos de prova foram recobertos com quatro tipos diferentes de resina epóxi, disponíveis no mercado. Os autores não apresentam resultados dos desgastes das amostras. Somente, é feita uma comparação entre as pressões de ensaio necessárias para causar dano visível, em tempo inferior a um minuto. Os valores de pressão apresentados variaram de, aproximadamente, 8 MPa a 12 MPa. Apesar das magnitudes de pressões utilizadas nos ensaios de Cheng, Webster e Wong (1990) serem similares às deste trabalho experimental, não é possível realizar comparações diretas no que diz respeito ao desempenho das amostras, já que não são fornecidas especificações suficientes das características das coberturas usadas pelos autores.

Para avaliar o efeito da erosão de cavitação nos testes, foram feitos ensaios com o equipamento tipo jato cavitante no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos, sem submersão, ou seja, com o jato incidindo livremente sobre a amostra. Para tanto, foram utilizados o bocal cônico de 132° e a amostra de concreto C.

Na Foto 6.11 visualiza-se o aspecto da amostra C, após vinte minutos de testes, sem submersão. Na mesma foto pode ser observado o estado da amostra com submersão. Nota-se o dano sensivelmente maior no caso do ensaio com submersão, ou seja, a erosão é devida, sobretudo, ao efeito da cavitação. Já, no caso do ensaio sem submersão, o desgaste é devido ao impacto.

Os resultados do trabalho experimental, com e sem submersão, aqui realizados coincidem com os resultados encontrados por Cheng, Webster e Wong (1990). Esses autores verificaram erosão desprezível em uma amostra de concreto submetida ao ensaio sem submersão, se comparado ao mesmo teste, com o mesmo tipo de amostra, com submersão.



Foto 6.11. Erosão em concretos: (a) jato livre; (b) jato submerso.

Ademais, no caso desta pesquisa, foi utilizado um acelerômetro para medir o valor da aceleração do recipiente dos testes. O valor da aceleração RMS verificado aparentemente foi de $2,8 \text{ m/s}^2$. Nos trabalhos de Martin et al (1981), Lemos (1986), Sato e Saito (2001) e Saito e Sato (2003) foi utilizado o acelerômetro para obtenção das acelerações em ensaios com cavitação. Contudo, não são verificados valores para índice de cavitação da ordem de 0,14, como aqui se apresenta. Na Figura 6.9 se apresenta um gráfico com os valores de aceleração obtidos nos testes com erosão de concreto.

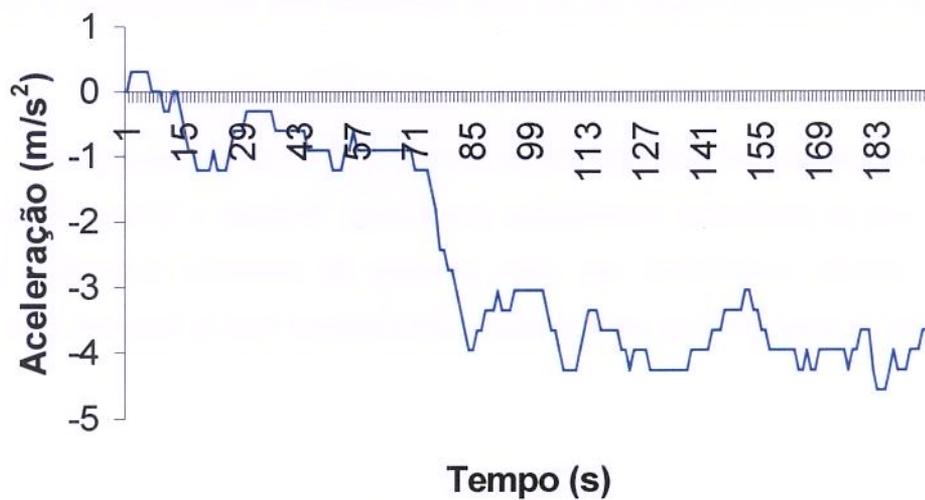


Figura 6.9. Aceleração registrada por acelerômetro em ensaio com jato cavitante.

6.2 ANÁLISE

6.2.1 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO EQUIPAMENTO

Dalfré Filho e Genovez (2003) comentam que quando se trabalha com equipamentos tipo jato cavitante empregando-se bocais, espera-se que os níveis de pressão gerados numa superfície alvo seja o fator preponderante na determinação da eficiência na operação de desgaste da superfície. De acordo com Houlston e Vickers (1978), com escoamento permanente da água de um jato que incide na direção normal a uma superfície, os níveis de pressão (P_s) gerados são dados por:

$$P_s = \frac{1}{2} \rho v_o^2 \quad (6.1)$$

Níveis moderados de pressão não seriam normalmente adequados para operações de limpeza de superfícies, por exemplo. Em distâncias maiores ao alvo, onde o jato tende a formar gotículas 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 transitórias entre a gotícula de água e uma superfície plana rígida pode ser aproximada pela equação de “golpe de aríete” (P_a):

$$P_a = \rho c v_o \quad (6.2)$$

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 P_b desenvolvida quando colapsa uma bolha em um meio fluido incompressível, para colapso isotérmico, segundo Johnson et al (1972) citados por Houlston e Vickers (1978) é:

$$P_b = \frac{P_s}{6,35} e^{(\frac{1}{\alpha})}, \text{ sendo} \quad (6.3)$$

α : relação entre a pressão de gás dentro da bolha no início de colapso e a pressão P_s .

Os resultados de P_b , para dois valores típicos de α , são apresentados na Figura 6.10. Os resultados indicam que a pressão de colapso de cavitação, P_b , é menor que a pressão de impacto das gotículas, P_a , para valores de jatos de água de 50 até 400 m/s. O limite máximo de P_b é restringido pelo efeito inerente da compressibilidade até a pressão do “golpe de aríete”. O ponto aonde P_b se iguala a P_a é função de α (ver Figura 6.10). O valor de $\alpha = 1$ indica o menor dano devido à cavitação. Para valores acima de $\alpha = 1$, o dano por cavitação é inexistente.

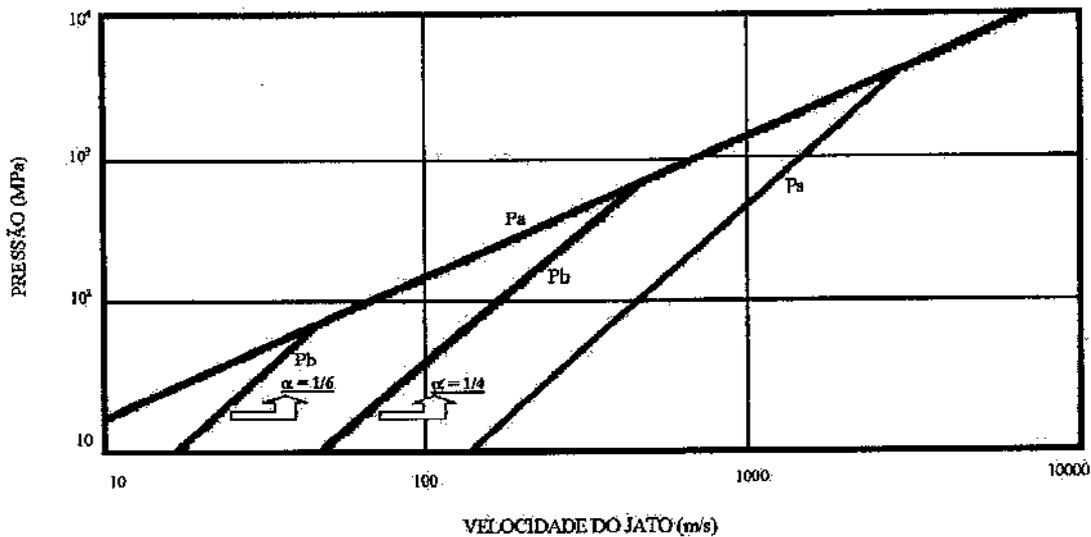


Figura 6.10. Níveis de pressão em um jato de água.
Fonte - Houlston e Vickers (1978).

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

$$R^* = \frac{P_b}{P_a} \quad (6.4)$$

Assim, para avaliar R^* , considera-se que a velocidade do som na água (c) a temperatura de 26°C é de 1496 m/s e que a massa específica (ρ) da água a temperatura de 26°C é 997 Kg/m³. Conhecendo-se o valor da velocidade do jato (v_o), calcula-se P_a pela Equação (6.2). Com o valor de α e da velocidade do jato, utilizando-se a Equação (6.3), calcula-se o valor de P_b . A eficiência (R^*) é, então obtida pela Equação (6.4). No caso deste trabalho, o valor de R^* calculado é de 0,43. Deve-se levar em consideração que o valor da celeridade é alterado pela incorporação de ar

na água dentro do recipiente do ensaio. Deve ser destacado que foi medida, durante os ensaios, a incorporação de oxigênio, mas não foi possível medir diretamente a incorporação de ar. Desta forma, adotou-se o valor da celeridade mais conservador.

No Quadro 6.5 é feita uma comparação entre as eficiências calculadas para os bocais deste trabalho e aquelas apresentadas por Dalfré Filho e Genovez (2003). Considerando-se o valor típico de $\alpha = 1/4$, utilizado por Houlston e Vickers (1978) e mantido para padrões de comparação, obtiveram-se os valores das eficiências (R^*).

Analisando-se as eficiências obtidas no Quadro 6.5, verifica-se que as mesmas aumentaram com o aumento da velocidade (utilizando-se diâmetros de orifícios menores) e da pressão disponível. As maiores eficiências obtidas foram com a utilização dos bocais cônico de 112° ($D=1,6$ mm e $P=34,5$ MPa) e CAVIJET[®], que possuem eficiências similares para os casos apresentados. As velocidades e eficiências do bocal CAVIJET[®] não foram fornecidas, tendo sido, então, calculadas com os dados que se apresentavam no trabalho de Conn et al (1984). Para o caso do bocal cônico de 20° com diâmetros de orifícios de 5,00 e 7,00 mm, não foi constatado o aparecimento da cavitação pelo autor. Verifica-se que os bocais usados por Houlston e Vickers (1978) e Conn et al (1984) que apresentam as maiores eficiências foram concebidos para realizar o corte de materiais. Ou seja, apesar da alta eficiência calculada não serve para o caso de ensaios de desgaste de concreto. Eficiências similares são observadas para o caso dos bocais cônico de 112° ($D=1,6$ mm e $P=20,7$ MPa) e cônico de 132° , apesar das diferenças entre as especificações dos ensaios. Verifica-se, ademais, uma eficiência, cerca de duas vezes maior, para o equipamento deste trabalho experimental em comparação com o de Dalfré Filho (2002).

Embora, o equacionamento apresentado forneça uma classificação relativa das eficiências dos equipamentos, verifica-se que o mesmo não leva em consideração o efeito da geometria e do acabamento dos bocais, que influenciam significativamente os resultados. A eficiência, portanto, depende do valor da pressão disponível, da geometria do bocal e da velocidade na saída do orifício. Desta forma, para indicar qual a melhor condição de ensaio, utilizando o equipamento tipo jato cavitante para avaliação de erosão de cavitação em amostras,

os ensaios de laboratório são imprescindíveis, uma vez que não há um modelo matemático que represente todas as variáveis atuantes.

Quadro 6.5: Eficiência dos equipamentos em função do tipo de bocal.

| Bocal | D (mm) | P (MPa) | v_0 (m/s) | R* | Autor |
|----------------|-----------|------------|----------------|------|---------------------------|
| Cônico de 112° | 1,6 | 20,70 | 158,00 | 0,45 | (Houlston e Vickers-1978) |
| Cônico de 112° | 1,6 | 34,50 | 206,80 | 0,60 | (Houlston e Vickers-1978) |
| CAVIJET® | 2,3 | 68,90 | 209,40 | 0,61 | (Conn et al-1984) |
| CAVIJET® | 2,4 | 66,20 | 209,60 | 0,61 | (Conn et al-1984) |
| Cônico de 20° | 3,0 | 3,50 | 89,30 | 0,26 | (Dalfré Filho-2002) |
| Cônico de 20° | 3,5 | 2,35 | 66,60 | 0,19 | (Dalfré Filho-2002) |
| Cônico de 20° | 5,0 | 0,40 | 33,40 | - | (Dalfré Filho-2002) |
| Cônico de 20° | 7,0 | < 0,10 | 17,60 | - | (Dalfré Filho-2002) |
| Cônico de 20° | 3,0 | 2,50 | 61,26 | 0,18 | (Dalfré Filho-2005) |
| Cônico de 132° | 2,0 | 12,80 | 149,83 | 0,43 | (Dalfré Filho-2005) |

Fonte - Adaptado de Dalfré Filho e Genovez (2003).

6.2.2 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO

De acordo com o apresentado no Capítulo 3, Tullis (1989) observa que água retirada de um nível mais baixo de um reservatório muito elevado pode apresentar baixo conteúdo de ar e núcleos. Isto torna conservadores os ensaios de laboratório. Por outro lado, se a água for supersaturada, intencionalmente ou não, o fenômeno da cavitação ocorrerá atenuado, sendo considerado do tipo gasoso e menos prejudicial ao sistema.

Conforme relatado no Capítulo 5, para a instalação experimental deste trabalho, foi utilizada água retirada diretamente da rede de abastecimento, sem recirculação da mesma durante os ensaios. Assim, evita-se alterar a quantidade de ar dissolvido e aspecto dos núcleos, e por consequência, os resultados dos testes não sofreriam a influência dos núcleos de ar em água de recirculação.

O monitoramento da concentração de oxigênio dissolvido nos ensaios aqui realizados (início e fim dos ensaios) apresentou variação de 4,95 ppm a 5,69 ppm entre todos os diferentes ensaios realizados. Vários autores, como Knapp, Daily e Hammitt (1970), Lichtarowicz (1979), Amblard, Bonazzi e Lecoffre (1988), Tullis (1989), Ikohagi et al (1996), Pham, Michel e Lecoffre (1997), Chan, Cheng e Chow (2002) citam a importância da influência da quantidade de ar dissolvido nos ensaios que simulam o aparecimento da cavitação. Contudo, apenas Amblard, Bonazzi e Lecoffre (1988) controlaram a quantidade de ar dissolvido nos testes, apresentando uma análise deste efeito. Os autores verificaram através da contagem microscópica dos danos que concentrações da ordem de 0.1 a 11.0 ppm, não produzem variação notável de erosão de cavitação. Baker et al citados por Martin et al (1981) verificaram em estudo com jatos cavitantes, que o índice de cavitação incipiente independe da quantidade de gás dissolvida no escoamento, caso o líquido não seja supersaturado na seção de teste.

De acordo com Jansen et al (1988), no caso da incorporação de ar nos escoamentos, de maneira a prevenir o aparecimento de danos por cavitação, concentrações de ar de 5 a 10 %, próximas às superfícies que se deseja proteger são suficientes para eliminar os riscos da cavitação.

Nos ensaios realizados com a bancada, em um escoamento com turbulência e conseqüente incorporação de ar são verificadas, normalmente, concentrações de até 10 ppm. Também, tendo sido verificada pequena variação da concentração de oxigênio nos diferentes testes realizados, pode-se concluir que, a utilização da água não recirculada, com entrada direta da rede de abastecimento, mostrou-se bastante adequada para os testes que simulam a erosão de cavitação. Desta forma, os resultados não foram afetados pelo efeito de aeração natural provocada pelo escoamento. Os resultados obtidos nos ensaios podem ser usados para aplicação nas estruturas hidráulicas.

6.2.3 MECANISMOS DE EROSÃO E DEPENDÊNCIA DA TAXA DE “PITTING” COM O TEMPO

Knapp, Daily e Hammitt (1970) realizaram uma série de ensaios para determinar a relação da taxa de “pitting” ao longo do tempo. Amostras de alumínio idênticas entre si foram

utilizadas. O tempo foi a única variável dos ensaios. Os resultados mostraram independência da taxa de “pitting” com o tempo. Os ensaios eram conduzidos até o tempo em que não se conseguia mais realizar a contagem de “pits”. Porém, presumem os autores, uma vez que a superfície tenha sido suficientemente alterada pelo “pitting”, o escoamento seria alterado e, por consequência, a taxa de erosão. Nos ensaios desses autores, realizados com amostras de alumínio, verifica-se a independência da taxa de “pitting” com o tempo. A tendência da erosão verificada é estabilizar-se depois de determinado tempo.

Segundo Lohrberg e Stoffel (2001), os mecanismos de danos envolvidos na erosão de cavitação ainda são matérias para discussão. Contudo, existem dois mecanismos sugeridos pelos quais danos ocorrem. O primeiro é devido ao choque das ondas de alta pressão gerado pelo colapso das cavidades. Estas pressões foram estimadas como sendo da ordem de 10^6 psi (69 GPa), de acordo com Tullis (1989), pressão suficiente para danificar qualquer material. A outra fonte de danos é devido ao que se chama de microjatos. Quando uma bolha colapsa próxima a superfície, a distribuição de pressão em torno da cavidade é assimétrica devido à presença da superfície. À medida que o núcleo colapsa, a porção dele oposta a superfície adquire uma velocidade muito maior e a bolha colapsa internamente, formando um microjato através do centro da mesma. Este microjato possui alta velocidade e cria um “pit” local quando impacta a superfície. De acordo com Lohrberg e Stoffel (2001), o jato se desloca da parede oposta da bolha à superfície sólida com velocidade acima de 100 m/s. O surgimento do transitório leva a altas pressões capazes de deformar o material, mas apenas na curta duração das solicitações.

As pressões de impacto originadas pelo fenômeno da cavitação são distribuídas em três dimensões nos “pits” onde a superfície rugosa decorrente oferece muitos pontos de concentração de tensões. Resulta, então, um alargamento da área afetada bem como um aprofundamento da erosão. Este último considerado bem mais violento que o contínuo ataque da superfície próximo à área do “pitting”, segundo Boetcher e Baltimore (1936). Além disso, alguns materiais apresentam resistências menores em determinadas direções de aplicação das tensões. Neste caso, a erosão devido à cavitação desenvolve-se seguindo uma combinação de menores resistências e maiores tensões.

Hammit (1966) faz observação similar a de Tullis (1980) nas fases iniciais do surgimento de danos, aonde podem ser observados dois tipos de formação de “pits”. O primeiro tipo foi denominado pelo autor de “pits cratera”, os quais devido a sua simetria e à aparência geral são presumidamente formados pela implosão de uma bolha única. Segundo o autor, o mecanismo tradicional para imposição das forças causadoras de danos numa certa superfície é pela radiação de ondas de choque desde o colapso da bolha e/ou a subsequente propagação, o que gera o segundo tipo, denominado de “pits fadiga”, devido à fadiga local e tem como características “pits” rasos de forma irregular, presumidamente causados por forças repetitivas devido a bolhas menos enérgicas. Estes também são, provavelmente, rupturas de evento único. Já que o tamanho e a forma dos “pits” não mudam com os testes subsequentes.

De acordo com Lohrberg e Stoffel (2001), após o efeito do microjato, uma bolha se divide em várias microbolhas. Estas são expostas às ondas de pressão geradas pelo micro jato e, então, implodem de maneira mais violenta, emitindo, elas mesmas, uma onda de pressão de grande amplitude, também capaz de erodir uma superfície sólida.

A aleatoriedade da formação de “pits” leva a indicar que não existe um período de incubação para os “pits cratera” se o método de observação for suficientemente preciso. Isso foi verificado por Hammit (1966) não apenas com a formação de “pits”, mas também pelo detalhamento das superfícies e pelo uso de uma amostra de teste irradiada, o que mostrou a perda de peso iniciando essencialmente pelo tempo zero. Possíveis mecanismos tipicamente considerados pela remoção de material pelo impacto do líquido são espalhamentos metálicos devido à natureza altamente transiente das forças na superfície ou pelo varrimento devido às altas velocidades transversais. Os “pits fadiga” apresentam um período de incubação, mas somente para esse mecanismo específico. Desta forma, para um sistema em que esse fenômeno é predominante existe um período de incubação.

Nos testes aqui realizados no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos com o jato cavitante, verifica-se, nas amostras de alumínio, no primeiro minuto de ensaio, como característica marcante o aparecimento de “pits” individuais maiores e mais profundos, que facilitam a contagem do dano na superfície. Também, pode-se perceber desde o primeiro tempo de ensaio a presença de “pits fadiga”.

Pode-se concluir que, considerando-se a taxa de danos incipientes de 1 pit/in²/min ($2,6 \times 10^{-3}$ pits/cm²/s) citada por Tullis (1989), em tempo de teste de 1 minuto para a distância de 5 cm e com uso do bocal cônico de 20° em arestas vivas (taxa igual a 0,505 pits/cm²/s), esse valor foi superado em quase 200 vezes, conforme se verifica pelo Quadro 6.1. Ademais, a presença no primeiro tempo de ensaio de “pits cratera” e “fadiga” indicam que, se há um período de incubação para o segundo tipo, devido ao mecanismo altamente transitório das forças na superfície, neste equipamento este período é inferior a um minuto. Nos demais instantes de ensaio, embora se verifiquem “pits cratera” a presença é muito mais marcante de “pits fadiga”. Assim, pode-se concluir que a erosão por cavitação é predominantemente causada por forças repetitivas devido a bolhas menos enérgicas, já a partir dos primeiros instantes do aparecimento do fenômeno. As constatações dos ensaios realizados coincidem com as observações de Hammitt (1966).

Uma vez formado um “pit” relativamente largo, independente do mecanismo, ele pode agir como ponto de concentração da ação de cavitação. A Figura 6.11 ilustra esse processo. Ela mostra uma seção transversal de um “pit” formado pelo colapso de uma bolha em C₁, a uma distância X acima da superfície. Admitindo que um tempo depois uma bolha tendo a mesma energia da primeira colapsa em C₂ exatamente acima do ponto C₁, porém a duas vezes a distância da superfície, se a energia do fluxo desta onda de pressão de colapso diminui proporcionalmente a $1/X^2$ a energia do colapso de C₂ será apenas um quarto da do colapso de C₁ ao atingir a superfície original. Então, não seria produzida uma deformação permanente. Entretanto, o “pit” existente captura um segmento esférico que pode ser associado a um ângulo central α_2 referente à segunda onda de pressão (cavidade 2) que seguiria decrescendo em tamanho e aumentando em intensidade à medida que é guiada para o “pit”. Ao atingir a posição indicada na Figura (6.11), a intensidade deve ser aproximadamente igual aquela da onda de pressão originada pela cavidade 1, que formou a cratera. Uma deformação plástica correspondente ao volume V₂ deve ocorrer na superfície da cratera. O material removido pode ser conduzido à beira da cratera após algum tempo conforme se ilustra na Figura 6.11. Dessa maneira, embora a intensidade da cavitação permaneça a mesma, sua eficiência foi aumentada.

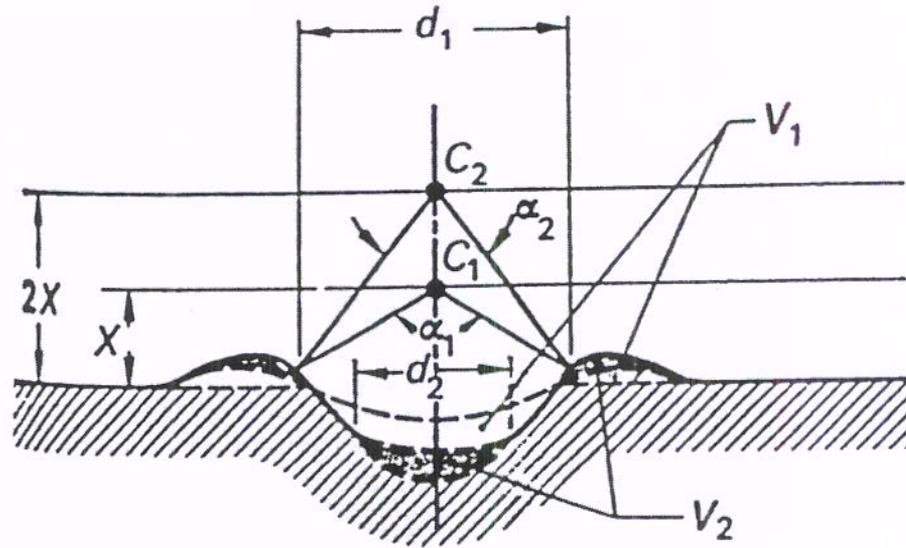


Figura 6.11. Modelo de aceleração dos danos devido à onda de choque.

Fonte - Knapp, Daily e Hammitt (1970)

Para materiais que possuam composição de grãos de diferentes tamanhos, verifica-se que a resistência à cavitação aumenta à medida que os tamanhos dos grãos diminuem. No caso dos concretos, o material cimentício tem uma resistência menor ao ataque que os agregados graúdos. Para o concreto, cada implosão de intensidade suficiente para erodi-lo remove uma porção do material que o compõe, no caso acontece primeiramente com a pasta endurecida. Aí, então, os agregados são arrancados à medida que o seu suporte é retirado.

Com os ensaios de amostras dos concretos A, B e C realizados aqui neste trabalho experimental, uma análise menos explícita é verificada, com relação à formação de “pits cratera” ou “fadiga”. No primeiro minuto de ensaio, é possível realizar a contagem de “pits”. Presume-se, a partir da análise superficial, com a lupa de aumento 160x, a presença de ambos mecanismos de erosão, ou seja, devido à implosão única e mais enérgica de uma bolha, como “pits” irregulares e mais rasos, devido à alta frequência de formação e implosão de bolhas menores e menos enérgicas. Este fato pode ser observado com o uso da luz estroboscópica, em que se visualiza a presença de bolhas menores e menos enérgicas, da ordem de 1 mm, numa frequência maior (ver Foto 6.12 – 167 Hz) e, bolhas maiores e mais enérgicas, da ordem de 3 mm, numa frequência menor (ver Foto 6.13 – 83,3 Hz).



Foto 6.12. Visualização do jato cavitante (frequência de 167 Hz).

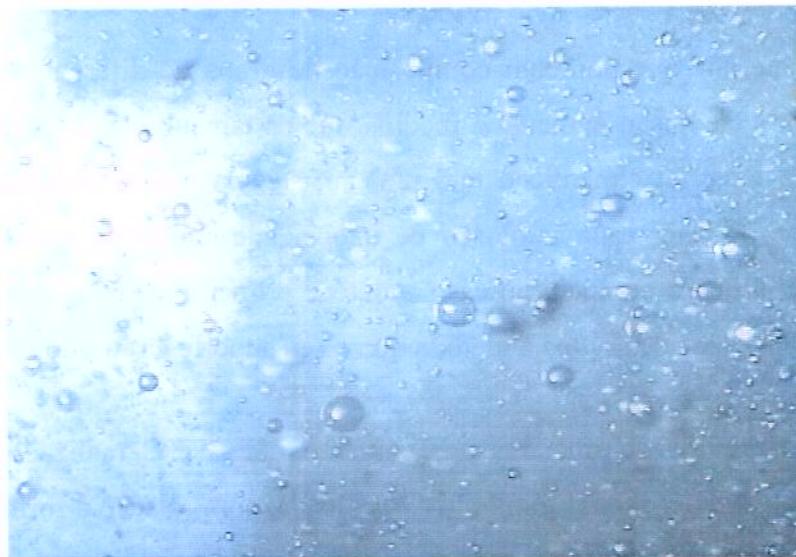


Foto 6.13 Visualização do jato cavitante (frequência de 83,3 Hz).

Fato é que, nos ensaios realizados no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos, a partir do segundo minuto, a superfície encontra-se bastante alterada, dificultando a visualização de “pits”, com o início de aprofundamento devido ao arrancamento do material. Ao aflorarem os agregados graúdos na superfície, nota-se nitidamente concentração de erosão em torno dele e a remoção da pasta em volta do agregado até o seu completo arrancamento. Este fato pode ser verificado em tempo inferior a um minuto. Para a amostra menos resistente a cavitação (amostra

B), usada neste trabalho, com resistência superior a 60 MPa, em vinte minutos de ensaio a mesma perdeu quase a metade de sua espessura inicial.

Nos trabalhos, em que amostras de concreto foram submetidas ao efeito erosivo da cavitação, como os de Gikas (1980), Cheng, Webster e Wong (1990) e Momber (2000), não foram estabelecidas relações entre os danos, visualizados em “pits”, e os mecanismos que originam essas erosões.

Outro aspecto relativo à erosão por cavitação é a corrosão. A cavitação remove o material oxidado da superfície expondo-a, o que acelera em muito o processo de corrosão. É possível que uma parcela de material removido pela cavitação seja devido à corrosão. Este conceito foi usado como método em laboratório para detectar dano por cavitação. Ou, ainda, a existência de materiais corrosivos na água podem causar aumento da rugosidade na superfície do metal o que gera um aumento da turbulência local, de acordo com Chan, Cheng e Chow (2002). De acordo com os autores, nos sistemas de abastecimento, os danos devido à corrosão e a cavitação coexistem, um intensificando o efeito do outro. Knapp, Daily e Hammitt (1970) sugerem que a principal função da corrosão na fadiga do material é a criação de numerosos pontos de concentração de tensões que podem iniciar ou acelerar o aparecimento de fissuras de fadiga. Dessa maneira, estudaram o comportamento de materiais, comumente utilizados no sistema de abastecimento de Hong Kong, submetidos à erosão de cavitação e corrosão. Os materiais testados foram latão, bronze, ferro fundido, aço inoxidável e cobre. Os autores citam que o dano por cavitação depende de três fatores. O primeiro fator é a hidrodinâmica do escoamento, determinado pelo projeto do sistema e condições de operação, o segundo, as propriedades dos materiais e, finalmente, as variáveis ambientais como a concentração de oxigênio dissolvido na água, a temperatura e propriedades químicas da água. Como resultado, verifica-se o desempenho das amostras na ordem decrescente de resistência aos dois efeitos, com a utilização da água de abastecimento, respectivamente na seguinte ordem: aço inoxidável, latão, bronze, cobre e ferro fundido.

A cavitação também pode acelerar o processo de erosão causado pela mistura água-sólido. A superfície é enfraquecida pela cavitação e é mais facilmente erodida pela ação abrasiva dos sedimentos. Dalfré Filho, Genovez e Paulon (2001) estudaram o desgaste de superfícies

hidráulicas submetidas à ação erosiva da mistura água-sólido. São citados como fatores de degradação das superfícies as variações de temperatura e as infiltrações. De acordo com os autores, nos locais aonde a velocidade da água supera 10 m/s, o concreto sujeito a este regime de trabalho deve ser resistente à erosão devido à mistura água-sólido e à cavitação.

6.2.4 RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E OS DANOS DEVIDOS À CAVITAÇÃO

Uma vez que os “pits” observados parecem ser originados de dois mecanismos competitivos (formação de “cratera” devido a uma única bolha e ruptura devido à fadiga), não são esperadas correlações perfeitas contra uma única propriedade mecânica possível. Porém, verifica-se que a resistência à cavitação e as propriedades de energia de deformação do material são importantes. Hobbs (1966) concluiu que os resultados dos ensaios de laboratório também indicaram que a resistência à compressão e a elasticidade são fatores importantes na determinação da resistência à erosão à cavitação de um dado material.

Correlações com várias propriedades simples como: tensão de ruptura, dureza superficial, tensão de escoamento foram apresentadas. Gikas (1980) cita que o parâmetro de medida seria relacionar propriedades do material e 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. Knapp, Daily e Hammitt (1970) citam a dureza do material e resistência à cavitação como ótima correlação para propriedades mecânicas, desde que haja ausência de corrosão. Esse fato pode ser atribuído à estreita relação entre dureza e resistência à fadiga de um material. Entretanto, o processo de corrosão refere-se apenas aos materiais metálicos. Para materiais não metálicos como os cimentícios, as propriedades envolvidas com sua resistência à cavitação são basicamente as propriedades mecânicas.

Se a dureza superficial do material é suficiente para suportar as tensões exercidas pelo colapso das cavidades ou se houver uma camada de dureza suficiente sobre um material mais macio, o processo ocorre da maneira descrita na seqüência. As implosões individuais das

cavidades solicitam o material em um ponto abaixo da sua resistência a compressão. Uma solicitação continua desta magnitude não resultaria em deterioração. Entretanto, as tensões são intermitentes, recorrendo milhares de vezes. Teoria e prática mostram que este tipo de variação de solicitação de tensões causa a fadiga de metais, mesmo que nunca tenha se alcançado o valor limite de resistência. Com aplicação decrescente de tensões, um número maior de recorrências é necessário para atingir a fadiga. Se a fadiga é um fator preponderante para o “pitting” devido à cavitação, isso explica a relação entre dureza e resistência à cavitação. Pode-se deduzir do exposto que uma camada fina de dureza maior é preferível a uma camada mais espessa de dureza relativamente menor. Assim, verifica-se que a utilização de cobrimentos altamente aderente às superfícies dos concretos podem melhorar o desempenho do concreto face à ação da cavitação.

No caso dos concretos, objeto deste estudo, adota-se, normalmente, como correlação da sua resistência à cavitação, a resistência à compressão axial. Verifica-se, contudo, que apresentá-la como única correlação a resistência à cavitação, é adequado, porém não suficiente. Resistência menor a cavitação em uma amostra de maior resistência à compressão axial (amostra B) que uma amostra de menor resistência à compressão axial (amostra A) pôde ser constatada durante os testes. Tal comportamento deve estar ligado ao tipo do agregado usado, uma vez que o diâmetro médio dos agregados graúdos usados foi mantido constante em todas as amostras e igual a 12,5 mm, e os demais elementos componentes são idênticos e nas mesmas proporções (mesmo traço). Verifica-se no caso da amostra A, com calcário, mais resistente à cavitação, agregados mais angulosos e porosos, o que deve favorecer uma melhor ligação entre pasta e agregado, como no primeiro caso. No caso da amostra B, o agregado granito é arredondado, menos poroso e, portanto, não deve favorecer uma ligação entre agregado e pasta. Isto apesar da dureza menor do calcário com relação ao granito. Assim, levando-se em consideração a dureza do agregado com relação ao do concreto, também não parece razoável como parâmetro único, em vista dos resultados dos testes. Com relação ao desgaste superficial, bons resultados com o calcário foram obtidos do trabalho de Dalfré Filho, Genovez e Paulon (2001), apesar de se verificar uma relação mais estreita entre dureza do agregado e a abrasão do concreto, do que para a cavitação, conforme se conclui de Mehta e Monteiro (1994).

O coeficiente de elasticidade na ruptura, como citado por Gikas (1980) constitui-se em outro parâmetro de correlação entre material e resistência a cavitação. Verifica-se, a partir dos

ensaios de laboratório de Hammitt (1966), que ambos os tipos de propriedades são envolvidas na maioria dos casos de danos por cavitação (“cratera” e “fadiga”). Segundo o autor, até que um material idealizado, de baixa resistência à compressão e de grande energia de deformação; ou um material de alta resistência à compressão, mas com baixa energia de deformação, possam apresentar alta resistência a danos por cavitação. Para materiais com energia de deformação que aumentam com a resistência à compressão, um aumento das duas propriedades resultaria numa maior resistência à cavitação. Aços inoxidáveis e várias ligas de metais refratárias que foram testados são deste tipo. Por outro lado, para alguns materiais, à medida que a energia de deformação aumenta, as propriedades de resistência diminuem. Ligas Cu-Zn-Ni se enquadram neste tipo, segundo Hammitt (1966). Os resultados dos testes realizados com este material confirmam estas suposições, e mostram que existe uma “troca” entre resistência e propriedades de energia, em termos de resistência à cavitação, de acordo com o autor.

Nota-se, contudo, que em um caso prático de um engenheiro de estruturas hidráulicas que opte entre diferentes tipos de concreto seja para construção de vertedores ou bacias de dissipação, seja no caso de reparos, correlações mais diretas como resistência à compressão axial e dureza do material, são preferíveis. Assim, ensaios de laboratório que relacionem resistência à cavitação, resistência à erosão devido à mistura água-sólido, resistência à compressão axial e dureza do material, são imprescindíveis para escolha correta do material.

6.2.5 RELAÇÃO ENTRE A TAXA DE EROSÃO E OS TEMPOS DE ENSAIOS

Para os testes realizados nesta pesquisa, as amostras foram erodidas até o tempo de 20 minutos de maneira a atingir a fase de erosão estável. Com relação as amostras de alumínio, verifica-se na Foto 6.3 que após cinco minutos de testes, a aparência da superfície é muito similar a de 20 minutos. Saito e Sato (2003) obtiveram dano de 25 pits/cm² após trinta minutos de ensaio, em amostra de alumínio, em um ensaio com $\sigma = 0,47$. Essa taxa foi superada na maioria dos casos dos ensaios aqui realizados, em tempo de um minuto.

No caso dos concretos, após um minuto de testes, já é possível verificar-se alteração significativa da superfície. Contudo, para avaliar-se eficiência da ligação pasta-agregado, sugere-se que as amostras sejam ensaiadas até, pelo menos, o tempo de quatro minutos.

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, de acordo com a análise apresentada por Dalfré Filho (2002). Diferentes critérios para se estabelecer os tempos de ensaios são verificados na literatura, como nos trabalhos de Gikas (1980), Cheng, Webster e Wong (1990) e Dalfré Filho (2002). Gikas (1980) realizou ensaios de concreto sofrendo erosão por cavitação até que a fase de erosão estável fosse atingida. Tendo o autor utilizado o dispositivo Venturi para os ensaios, foram necessárias até 150 horas de testes para obtenção de resultados. Cheng, Webster e Wong (1990) adotaram como critério, para o equipamento tipo jato cavitante, o monitoramento das pressões que causassem dano visível, em um minuto de teste, nas amostras de concreto. Dalfré Filho (2002) realizou ensaios até o tempo de cinquenta minutos, de maneira a verificar fossa de erosão em amostras de concreto. Além disso, devido às baixas pressões disponíveis, foi necessário utilizar-se amostras com baixo valor de resistência a compressão axial para avaliação do fenômeno erosivo da cavitação.

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 13 mm 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 6.12 mostra a curva do dano relativo para materiais normalmente usados em estruturas hidráulicas, seja na construção como nos reparos.

Knapp, Daily e Hammitt (1970) citam a similaridade entre os danos causados pelo impacto de um jato e o dano por cavitação. De uma maneira geral, verifica-se que materiais podem ser agrupados de acordo com sua resistência a cavitação, em ordem similar, submetidos tanto a ensaios com jato cavitante ou equipamentos que incorporem o dispositivo Venturi. Dessa maneira, conclui-se que as variáveis que governam as taxas de erosão dos materiais em ambos equipamentos devem ser similares.

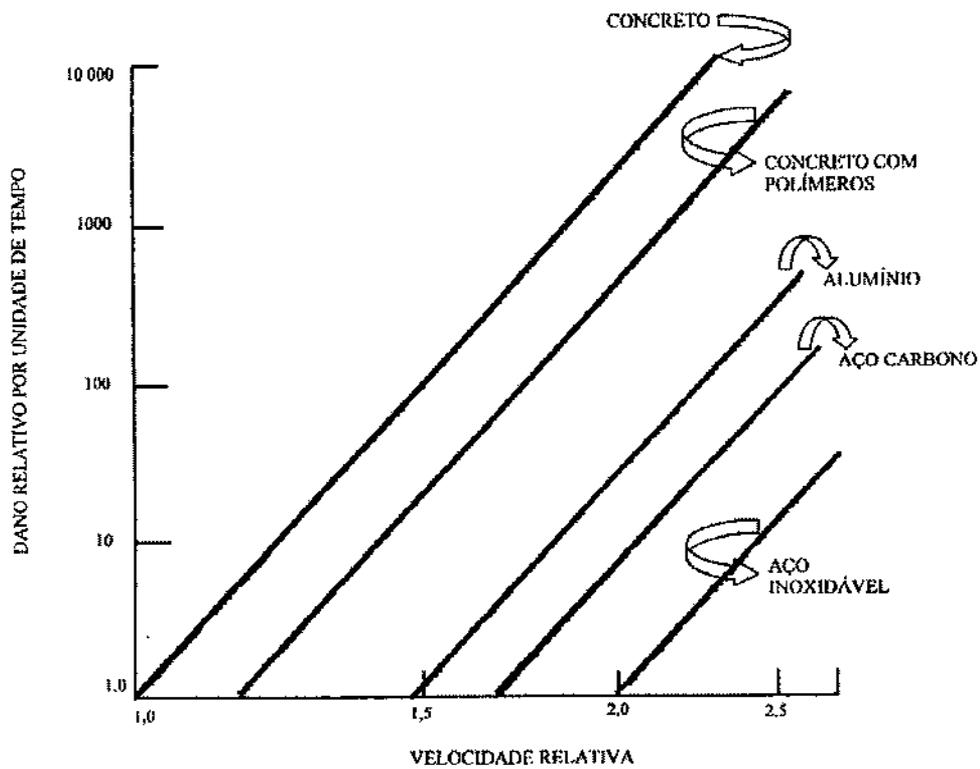


Figura 6.12. Resistência à cavitação comparativa entre vários materiais.

Fonte - Falvey (1990).

Pode-se comparar o potencial de cavitação entre um Venturi e um jato submerso. Considere-se que ambos estejam instalados em uma tubulação de mesmo diâmetro e, ainda, que o diâmetro da garganta do Venturi seja o mesmo do jato contraído do jato submerso. Se ambos operam à mesma pressão de montante e vazão, o jato submerso é muito mais suscetível ao surgimento da cavitação devido ao alto grau de turbulência gerada na camada de cisalhamento ao redor do jato, de acordo com Tullis (1989).

Na Foto 6.14, feita com o auxílio da luz estroboscópica a frequência de 208,30 Hz, mostra-se o jato desenvolvido nos ensaios, com o uso do bocal cônico de 132° e arestas em cantos vivos. Na Foto 6.15, com a luz estroboscópica à frequência de 166,67 Hz, visualiza-se a formação dos filamentos de vórtices gerados na camada de cisalhamento ao redor do jato.



Foto 6.14. Aspecto do jato ultra-rápido (frequência de 208,30 Hz).



Foto 6.15. Aspecto dos filamentos de vórtices ao redor do jato(frequência de 166,67 Hz).

No trabalho experimental aqui realizado com o equipamento tipo jato cavitante, após vinte minutos de ensaios, já eram verificados a mudança da superfície e o início do aprofundamento da amostra. Se, nos ensaios citados por Falvey (1990) com o Venturi com baixas velocidades, como a de 30 m/s, houvesse sido empregado o equipamento tipo jato cavitante, provavelmente, o mesmo dano seria obtido em um tempo muito menor, sem alteração dos

resultados já que, como verificou Tullis (1989), em ambos equipamentos atuam basicamente as mesmas variáveis.

Hobbs (1966) verificou que semelhantes taxas relativas da resistência dos materiais podem ser obtidas em ensaios de cavitação de longa duração e em ensaios de impacto de jatos repetidos, mais rápidos. Porém, a correlação deve ser estendida para estabelecer se os resultados dos testes de laboratório estão de acordo com o comportamento dos mesmos materiais em campo.

Dessa maneira, nota-se, atualmente, a necessidade em se desenvolverem equipamentos eficientes, que forneçam resultados rápidos e, ainda, de baixo custo. O equipamento tipo jato cavitante desenvolvido nesta pesquisa experimental alia essas vantagens na simulação de erosão por cavitação, tanto em materiais metálicos, como em materiais cimentícios.

7 CONCLUSÕES

A importância do efeito da erosão de cavitação nas estruturas hidráulicas motivou o desenvolvimento de diferentes equipamentos para investigar a resistência dos materiais face a esta ação. O equipamento tipo jato cavitante utiliza um bocal especialmente projetado para simular o fenômeno da cavitação desgastando uma amostra em um período de tempo curto. Isso ocorre, sobretudo, devido à magnitude da velocidade do jato que é superior a 100 m/s. Para maior eficiência deste equipamento é necessária uma combinação da geometria do bocal, do diâmetro do orifício e da pressão disponível. Verifica-se que o aumento da eficiência erosiva do equipamento aumenta com a velocidade do jato e sofre interferência da geometria do bocal empregado. Assim, é necessário um estudo sistemático usando diferentes geometrias de bocais e diâmetros de orifícios.

Dadas as características do fenômeno da cavitação, somente através de estudos experimentais pode se avaliar o desgaste provocado, assim como investigar parâmetros de correlação entre a severidade da erosão por cavitação e as condições do escoamento, especialmente no que diz respeito à distribuição de pressões. No caso das estruturas hidráulicas o problema é complexo, pois se verifica o efeito simultâneo do fenômeno da cavitação e do impacto de um jato de alta velocidade.

No estudo experimental desenvolvido neste trabalho foi proposto e testado um equipamento tipo jato cavitante para avaliação de erosão por cavitação. Os ensaios indicaram que este tipo de equipamento é adequado para a realização de ensaios de resistência à cavitação de concretos. A instalação permite variar os parâmetros de ensaios, como o tipo de bocal, o diâmetro de orifício e a distância do bocal à amostra. Pode-se detectar erosões severas nas amostras de concreto, em tempo da ordem de um minuto. A partir dos ensaios realizados neste trabalho, nota-se que há uma variação pequena dos impactos registrados entre as diferentes geometrias dos

bocais e as três diferentes distâncias de referência utilizadas entre os bocais e as amostras. Os ensaios realizados com o jato livre, ou seja, sem submergência da amostra, permitiram isolar o efeito de desgaste provocado pelo impacto do jato em alta velocidade. Assim, os resultados observados de erosão das amostras devem-se, preponderantemente, à ação da cavitação.

O uso dos resultados de laboratório para análise de seleção de materiais resistentes à cavitação é imprescindível, assim como correlacioná-los pelo menos a algum parâmetro que identifique as características das amostras como, por exemplo, a resistência à compressão axial e o tipo de agregado utilizado.

Verifica-se a necessidade de se desenvolverem ensaios rápidos, eficientes e econômicos há algumas décadas. Atualmente, a tecnologia disponível permite obter e medir parâmetros de ensaios com rapidez e precisão. O equipamento tipo jato cavitante, utilizado nesta pesquisa experimental, atende as expectativas de ensaios de erosão de concreto para uso nas estruturas hidráulicas.

Como padronização dos ensaios para o uso do jato cavitante, sugere-se adotar um tempo de ensaio de quatro minutos para avaliação da resistência dos materiais face à ação da cavitação. O índice de cavitação 0,14 empregado nestes ensaios é o que se mostrou indicativo de desgaste por cavitação em estruturas hidráulicas. Sugere-se 0,05 m de distância entre o bocal e o corpo de prova, e o uso de bocal cônico de 132° , com arestas vivas. Este bocal, além de apresentar facilidade de confecção, forneceu resultados rápidos e satisfatórios para a indicação do comportamento de materiais submetidos ao efeito erosivo da cavitação e do impacto de um jato d'água de alta velocidade, não apenas em concretos, mas também em materiais metálicos. Recomenda-se, também, a manutenção do valor de 0,14 para o índice de cavitação e as características do equipamento de ensaio conforme foram especificadas.

Os resultados dos desgastes dos concretos apresentados neste trabalho experimental são ilustrativos para testar a eficiência do equipamento. Em casos reais de construção ou reparos das estruturas hidráulicas deverá ser desenvolvido um estudo sistemático e cuidadoso com outras amostras de concreto, de diferentes traços e composições. O uso de aditivos que melhoram as propriedades da zona de transição, ou seja, da ligação entre pasta e agregado, como a sílica ativa,

ou ainda, a cobertura do concreto, com algum material elástico e de alta aderência à superfície do mesmo favorecem o desempenho do material face ao fenômeno da cavitação.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização de uma bomba de ensaio que permita a variação das pressões, independentemente do tamanho do diâmetro de orifício, por exemplo, uma bomba com rotação variável ou similar. Assim, será possível alterar os índices de cavitação dos testes para diferentes valores de vazão e pressão, dentro de um intervalo de valores que mantenham os períodos curtos de testes, ou, ainda, manter-se o índice de cavitação, alterando a pressão a montante do orifício e a velocidade do jato, de maneira a maximizar os danos devido ao impacto.

Com relação aos bocais, verifica-se que a geometria e o acabamento dos mesmos exercem forte influência no desempenho erosivo do jato cavitante. Estudos experimentais com outras geometrias e acabamentos internos poderiam ser feitos.

Nota-se a carência de pesquisas no que se refere às pressões transitórias que se verificam na incidência do jato cavitante sobre a amostra, assim como o desenvolvimento de um modelo matemático para este fenômeno, confirmado através de estudos experimentais. Esses aspectos particulares do fenômeno devem ser abordados em pesquisas futuras.

Constata-se, na literatura, que diferentes autores citam os efeitos decorrentes da incorporação de ar nos ensaios que simulam o fenômeno da cavitação. Porém, poucos trabalhos se preocuparam em medir a incorporação de ar durante os testes e a sua influência nos resultados, sobretudo no que se refere à alteração do valor da celeridade. Assim, testes com diferentes valores de incorporação de ar ao escoamento devem ser realizados, investigando-se os seus efeitos nos resultados e, se possível, correlacioná-los aos valores de concentração de oxigênio, que são facilmente obtidos.

Conclui-se que o equipamento tipo jato cavitante se mostrou adequado e eficiente para avaliação do desgaste provocado pela ação da cavitação. De acordo com a proposta do equipamento ele permite a verificação do desgaste em um tempo de ensaio curto. As

características da bancada de ensaio permitem que ele seja instalado em laboratório ou em campo.

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.

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.

BOETCHER, H.N.; BALTIMORE, M.D. Failure of metals due to cavitation under experiental conditions. **Transactions of the American Society of Mechanical Engineers**. v.58. p. 355-360, 1936.

BOEHM, R.; STOFFEL B.; LUDWIG G. Invetigations on the unsteady behaviour of cavitation and the corresponding pressure field. **La Houille Blanche**, Paris, année 52, n.342, p.84-88, avril/mai 1997.

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.

CANGIOLI, G.; MANFRIDA, G. Improvements to acoustic techniques for the detection of cavitation inception. **La Houille Blanche**, Paris, année 52, n.342, p.123-128, avril/mai 1997.

CHADWICK, A.; MORFETT, J. **Hydraulics in civil and environmental engineering**. 3. ed. Ed. E & FN Spon, 1999. 600p.

CHAN, W.M.; GHENG, F.T.; CHOW, W.K. Susceptibility of materials to erosion in Hong Kong. **Journal of the American Water Works Association**, v. 94, n. 8, p.76-84, aug 2002.

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.

COLEMAN, S. L. et al. Comparison of tunnel and jet methods for cavitation erosion testing. **Wear**. Elsevier: New York, n.184, p.73-81, 1995.

CONN et al. Some unusual applications for cavitating water jets. In: **International Symposium on Jet Cutting Technology**, 7º, 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.

DALFRÉ FILHO, J.G. Desenvolvimento de Equipamento para avaliação de erosão por cavitação. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade de Campinas. Fevereiro de 2002, 97p.

DALFRÉ FILHO, J.G.; GENOVEZ, A.I.B. A Influência dos Bocais na Eficiência dos Equipamentos para Avaliação de Erosão por Cavitação. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, XV, 2003. Associação Brasileira de Recursos Hídricos: ABRH, nov.,2003 (CD-ROM).

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.

HAMMITT, F.G. Damage to solids caused by cavitation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 260, p.245-255, 1966.

HOBBS, J.M. Practical Aspects of cavitation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 260, p.267-275, 1966.

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.

IKOHAGI, T. et al. High-speed observation of ultrahigh-speed submerged water jets. **Experimental Thermal and Fluid Science**. New York: Elsevier, n.12, p.411-416, 1996.

ISSELIN, J. C. et al. Comportement d'une bulle de cavitation à proximité d'une paroi solide: contribution à l'étude du mécanisme d'érosion. **La Houille Blanche**, Paris, année 52, n.343, p.29-33, juin 1997.

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.

JOUSSELLIN, F.; BERNARDINI, J.; DUMONT, S. Instabilité dans un inducteur cavitant: analyse fréquentielle et mesure de volume de poche. **La Houille Blanche**, Paris, année 52, n.342, p.39-44, avril/mai 1997.

KNAPP, R.T.; DAILY, J.W.; HAMMITT, F.G. **Cavitation**. 1 ed. MacGraw-Hill, 1970. 578p.

LEACH, S.; WALKER, G.L. Application of high speed liquid jets to cutting. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 260, p. 295-308, 1966.

LEMOS, Y. F. Válvula para dissipação de energia e controle - Aplicação em instalações hidráulicas. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.1986, 126p.

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.

LOHRBERG, H.; STOFFEL, B. Measurement of cavitation erosive aggressiveness by means of structure born noise. In: **International Symposium on Cavitation (CAV2001)**, 4º, 2001. Session: A3.003.

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.

MARTIN, S. C.; MEDLARZ, H.; WIGGERT, D.C.; BRENNEN C. Cavitation inception in spool valves. **Transactions of the ASME**, v. 103, p. 564-576, dec.1981.

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

MOMBER, A.W. Short time cavitation erosion of concrete. **Wear**. Elsevier: New York, n.241, p.47-52, 2000.

PHAM, T. M.; MICHEL, J.M.; LECOFFRE, Y. Qualification et optimization d'un compteur dynamique à ogive centrale. **La Houille Blanche**, Paris, année 52, n.342, p.74-80, avril/mai 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)

REBOUD, J. L.; PATELLA, R.F. etude de l'interaction fluide-structure en érosion de cavitation. **La Houille Blanche**, Paris, année 52, n.343, p.34-40, juin 1997.

SAITO, Y.; SATO, K. Cavitation bubble collapse and impact in the wake of a circular cylinder. In: **International Symposium on Cavitation (CAV2003)**, 5°, 2003. Session: Cav03-GS-11-004.

SATO, K.; SAITO, Y. Unstable behavior in a circular-cylindrical orifice flow. In: **International Symposium on Cavitation (CAV2001)**, 4°, 2001. Session: CaA9.003.

TULLIS, J.P. **Hydraulics of pipelines - pumps, valves, cavitation, transients**. 1. ed. Ed. John Wiley and Sons, 1989. 266p.

WHITE, F.M. **Mecânica dos Fluidos**. 4.ed. Ed. McGraw-Hill, 2002. 570p.

ANEXO A - Procedimento de ensaio
EQUIPAMENTO TIPO JATO CAVITANTE

| | |
|--|---|
| LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA E MECÂNICA DOS FLUIDOS |  UNICAMP |
| PROCEDIMENTO DE ENSAIO - EQUIPAMENTO JATO CAVITANTE | |

Roteiro para ligar o equipamento/início dos ensaios

| Passo | Item | Verificado? |
|-------|---|-------------|
| 1 | Montagem do sistema de aquisição de dados | |
| 2 | Inserir a amostra no recipiente metálico | |
| 3 | Regular a distância do bocal à amostra com o auxílio do sistema de regulagem | |
| 4 | Verificar se a válvula reguladora de pressão está totalmente aberta (aliviada ⇒ sentido anti-horário) | |
| 5 | Abrir o registro de alimentação da bomba | |
| 6 | Ligar a bomba | |
| 7 | Ligar todo o sistema de aquisição de dados | |
| 8 | Iniciar a aquisição dos dados | |
| 9 | Fechar lentamente a válvula reguladora de pressão até atingir a pressão desejada (sentido horário) | |

Roteiro para desligar o equipamento/final dos ensaios

| Passo | Item | Verificado? |
|-------|--|-------------|
| 10 | Abrir lentamente a válvula reguladora de pressão até aliviá-la totalmente (sentido anti-horário) | |
| 11 | Interromper a aquisição de dados | |
| 12 | Desligar o sistema de aquisição de dados | |
| 13 | Desligar a bomba | |
| 14 | Fechar o registro de alimentação da bomba | |
| 15 | Drenar completamente a água do recipiente através do dreno inferior | |

OBS: - Mensalmente, realizar a limpeza do filtro na linha de alimentação da bomba;
- Semestralmente, ou a cada 2500 h de funcionamento, realizar a manutenção da bomba, com troca do óleo do Carter (verificar manual do usuário).