

Capítulo 91

Cavitação, abrasão e ataque químico em vertedouros e dissipadores de energia

Capítulo 91- Cavitação, abrasão e ataque químico em vertedouros e dissipadores de energia

91.1 Introdução

Conforme ACI, 1998 as três principais causas de erosão em estruturas de concreto são:

1. Cavitação
2. Abrasão
3. Ataque químico

Vamos explicar cada um dos três casos, detalhando mais o caso mais comum que é o da cavitação.

91.2 Cavitação em bombas centrífugas

Cavitação é um fenômeno hidráulico no qual se formam bolhas de vapor que repentinamente implodem quando elas se deslocam no rotor. Estas implosões no rotor da Figura (91.1) a (91.3).



Figura 91.1- Estragos feito em um rotor de bomba devido a cavitação



Figura 1.2 Cavitação em bomba no ano 2007

7



Figura 91.3 Cavitação em bomba no ano 2007

Os efeitos mecânicos, além do desgaste dos rotores, causam vibração que pode danificar totalmente o rotor da bomba e demais peças.

A cavitação ocorre quando a pressão do líquido é reduzida pela pressão de vapor e então começa o processo de fervura, sem que a temperatura do líquido mude.

Para prevenir a cavitação é necessária que a pressão não caia abaixo da pressão de vapor do líquido. Para isto usa-se o que se chama NPSH que é um acrônimo do termo inglês *Net Positive Suction Head* e há duas, uma fornecida pelo fabricante da bomba que é o *NPSH requerido* e o *NPSH disponível* no local calculado pelo projetista sendo necessário que $NPSH_{disponível} \geq NPSH_{requerido}$.

$$NPSH_{disponível} - NPSH_{requerido} \geq 1,0\text{m a } 1,5\text{mca.}$$

$$NPSH_{disponível} = H_{pa} + H_s - h_s - H_{vp}$$

Sendo:

$NPSH_d =$ NPSH disponível no local (m)

Hpa= pressão atmosfera na superfície do líquido no poço de sucção bombeado (m). Geralmente admitido como 10,3m ao nível do mar. Em São Paulo a pressão atmosférica é 9,5m.

Hs= altura da sucção do líquido (m). É a altura da superfície do líquido no poço até o centro do rotor da bomba. Pode ser positivo ou negativo (sucção).

hs= perdas de cargas total na linha de sucção (m)

Hvp= pressão de vapor do líquido na temperatura de operação a 20°C (m). Geralmente Hvp=0,235m.

A pressão de vapor depende da temperatura ambiente e pode ser obtida conforme Tabela (91.1)

Tabela 91.1-Vapor de pressão em função da temperatura

Temperatura (°C)	Pressão de Vapor Hvp (m)
0	0,062
15	0,171
20	0,235
23,9	0,303
37,8	0,658

Adaptado de FHWA, 2001

Tabela 91.2- Alturas máximas de sucção conforme altitude e pressão atmosférica

Altitude (m)	Pressão atmosférica (m)	Limite prático de sucção (m)
0	10,33	7,60
300	10,00	7,40
600	9,64	7,10
900	9,30	6,80
1200	8,96	6,50
1500	8,62	6,25
1800	8,27	6,00
2100	8,00	5,70
2400	7,75	5,50
2700	7,50	5,40
3000	7,24	5,20
São Paulo cota 760	9,50	

Estimativa da pressão atmosférica em função da altitude

Conforme Heller, 2006 podemos estimar o valor da pressão atmosférica local em função da altitude.

$$P_a = 10,33 - h / 900$$

Para a capital de São Paulo $h=760\text{m}$

$$P_a = 10,33 - 760/900 = 9,5\text{m}$$

Margem de segurança do NPSH

Segundo Grundfoss, 2005 a margem de segurança do NPSH deve ser suficientemente grande para suportar variações numa situação onde as condições reais podem ser diferentes das calculadas teoricamente. As perdas de carga na tubulação de sucção podem ser incorretamente calculadas e o ponto de funcionamento real da bomba pode diferir da teoria devido a variações da curva Q/H e cálculos incorretos da resistência da tubulação de sucção.

A Grundfoss, 2005 baseado no *Europump, 1997- NPSH for rotodynamic pumps, reference guide* recomenda que para bombas instaladas horizontalmente em tubulações retilíneas deve ser usada margem de segurança de 1,0m a 1,5m. Para bombas instaladas verticalmente a margem de segurança deve ser de 2,0m a 2,50m.

$$\text{NPSH}_d \geq \text{NPSH}_r + 1,5\text{m}$$

Dica: o NPSH disponível deve ser sempre maior que 1,5m do NPSH requerido

91.3 Cavitação em vertedouros e dissipadores de energia

Temos cavitação não só em bombas centrifugas, mas também em vertedouros e dissipadores de energia.

Conforme Falvey, 1983 somente em 1915 foram apontados problemas de cavitação e os grandes danos causados pela cavitação ocorreram em 1941 no túnel do vertedor da barragem Hoover nos Estados Unidos. No túnel de concreto com redução de secção da Figura (91.4) a cavitação está na letra “c”.

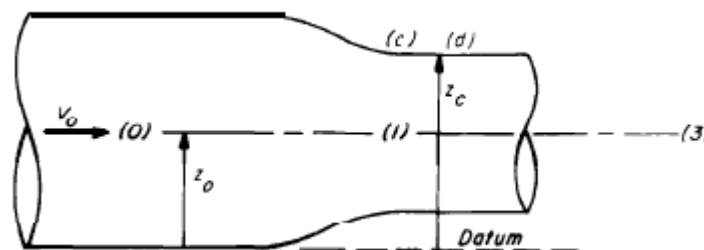


Figura 91.4- Túnel de concreto com cavitação na letra “c”

Fonte: ACI, 1998

Cavitação é a formação de bolhas ou cavidades em um líquido. Estas bolhas ou cavidades são preenchidas com vapor de ar e ar e quando a pressão cai a determinado valor, a água se evapora danificando a estrutura.

A queda de pressão geralmente é causada por irregularidades na superfície da estrutura e altas velocidades no escoamento da água.

Vertedouros muito altos produzem velocidades de 10m/s a 15m/s e quando a água encontra uma superfície irregular ou uma curva, há possibilidade de se produzir cavitação no concreto.

Quando o escoamento tem uma convergência abrupta, irá produzir queda de pressão e formação de cavidades no concreto devido a cavitação.

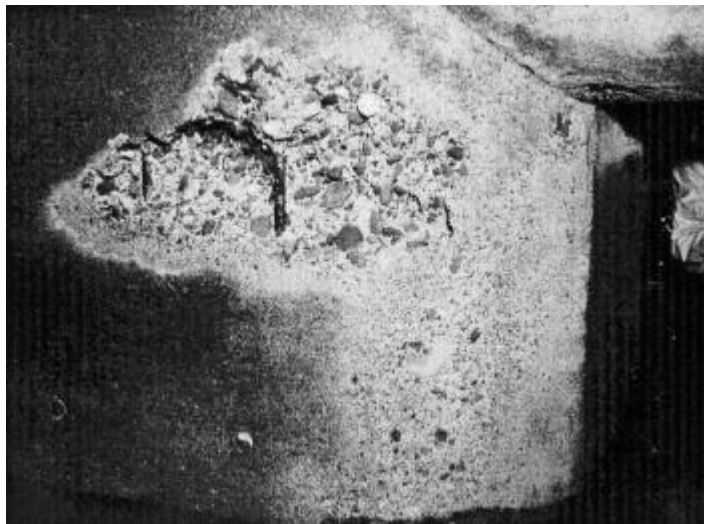
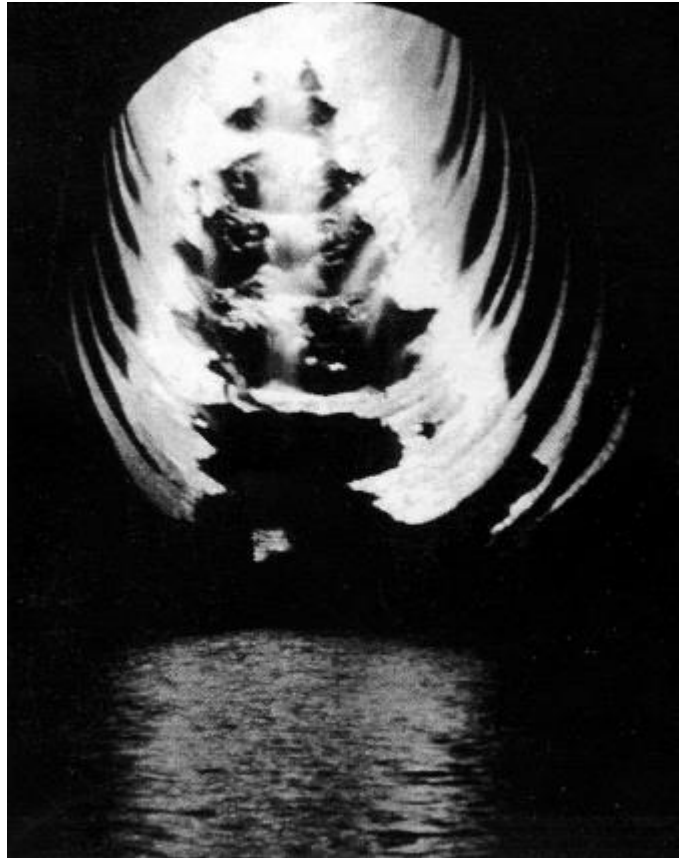


Figura 91.5- Cavitação em um túnel com contração
Fonte: ACI, 1998



**Figura 91.6-Configuração de cavitação em tunel chamada “árvore de natal”
Fonte: ACI, 1998**

Khaturia, 2005 mostra a equação do index de cavitação σ_c .

O valor $y.V^2/Rc$ depende da forma da estrutura, caso seja côncavo usa-se o sinal “+” e caso seja convexo usa-se “-”.

Caso de estrutura côncava

$$\sigma_c = (y.\cos \theta + y.V^2/gRc + p_b - p_v) / (V^2/2g)$$

Caso de estrutura convexa

$$\sigma_c = (y.\cos \theta - y.V^2/gRc + p_b - p_v) / (V^2/2g)$$

Sendo:

σ_c = index de cavitação

y = profundidade da água (m)

θ = ângulo com a horizontal do canal com declividade

Rc = raio de curvatura do canal com declividade se existir

p_b = pressão barométrica da água. Geralmente $p_b = 10,3m$

p_v = pressão de vapor de água, usualmente $p_v = 0,233 \text{ m}$

V = velocidade da água (m/s)

Substituindo os valores da pressão barométrica e de vapor teremos:

Caso de estrutura côncava

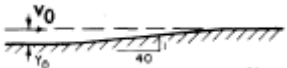
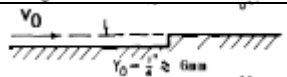
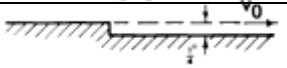
$$\sigma_c = (y \cdot \cos \theta + y \cdot V^2 / gRc + 10,67) / (V^2 / 2g)$$

Caso de estrutura convexa

$$\sigma_c = (y \cdot \cos \theta - y \cdot V^2 / gRc + 10,67) / (V^2 / 2g)$$

Salientamos a importância prática de se obedecer as recomendações das pesquisas. Assim existe maneira correta de dimensionar um vertedor tipo Ogge, bem como regras práticas para as transições em canais e nos perfis longitudinais côncavo e convexo que foram estudadas para manter as pressões positivas evitando a cavitação.

Tabela 91.3- Valores usuais do index de cavitação apresentados por Falvey, 1990 conforme Khasturia, 2005.

Estrutura ou tipo de irregularidade	σ	Referência
Entrada de tunel	1,5	Tullis, 1981
Expansão súbita em tunel	1,0* a 0,19	Russe, 1967 e Rouse, 1966
Pilar de Impacto		
Com forma piramidal	1,4 a 2,3	Galperin, 1977
Com forma triangular (USBR Tipo III)	0,33	Khasturia, 2000
Bloco em forma de T (Bhavani bacia de dissipação)	0,68	Kuttiammu, 1951
Superfície de vertedouros		
Comportas fixas e removíveis	0,20 a 0,30	Falvey, 1982 Wagner, 1967 e Ball, 1976
Concreto áspero com 20mm de depressão máxima	0,60	Ball, 1976
Declividade no fluxo da água	0,20	Ball, 1976 Arndt, 1977 Falvey, 1982
Declividade ao longo do escoamento	0,20	
Diferença de nível acima do fluxo da água não excedendo 6mm	1,6	
Diferença de nível abaixo do fluxo da água não excedendo 6mm	1,0	
Dente final na bacia de dissipação	1,05 a 1,75	
Jato de água em dissipador	0,15 a 0,70	

(*): não usual

O Manual de Critérios de projeto civil de Usinas Hidroelétricas da Eletrobrás de outubro de 2003 adota como índice de cavitação incipiente = 0,25 que corresponde a irregularidades graduais de acabamento da superfície de concreto, da ordem de 20:1. Os valores calculados da cavitação natural do escoamento deverá ser menor que 0,25.

Brito, 2011 sumariza na Tabela (91.4) as exigências de projeto de acordo com Falvey, 1990.

Tabela 91.4- Critérios para prevenção de erosão por cavitação conforme Brito, 2011

Número de cavitação σ	Exigências do projeto
>1.80	Nenhuma proteção contra a erosão por cavitação é requerida.
0.25–1.80	O contorno sólido pode ser protegido por tratamento superficial, por exemplo, suavizando todas irregularidades de superfície.
0.17–0.25	Modificação do projeto, por exemplo, através do aumento da curvatura do contorno sólido.
0.12–0.17	Proteção por aeração induzida por aeradores do tipo ranhura ou degrau.
<0.12	O contorno sólido não pode ser protegido e deve-se assumir outra configuração

(Fonte: Falvey, 1990, página 76)

Da mesma maneira que a bomba centrífuga compara-se o NPSH disponível com o requerido, sendo que o NPSH disponível deverá ser maior que o NSPH requerido.

A Tabela (91.3) fornece valores do index de cavitação para os quais tem início o processo de danificação da estrutura. Assim um bloco de um dissipador de energia tem $\sigma=2,3$ e temos que o dissipador que vamos construir tenha mais que $\sigma_c >2,3$.

Dica: o valor obtido do index de cavitação deve ser maior que os valores da Tabela (91.3).

Deve ser mantido pressões baixas e velocidades também baixas.

Falvey, 1983 apresenta a Figura (91.7) que mostra os danos causados por cavitação, podendo ser muitos danos, danos médios e nenhum danos.

Tudo depende do número de horas de operação e do index de cavitação.

Assim um index de cavitação de 0,29 com 100h de operação estará na região onde não haverá danos de cavitação conforme Figura (91.7).

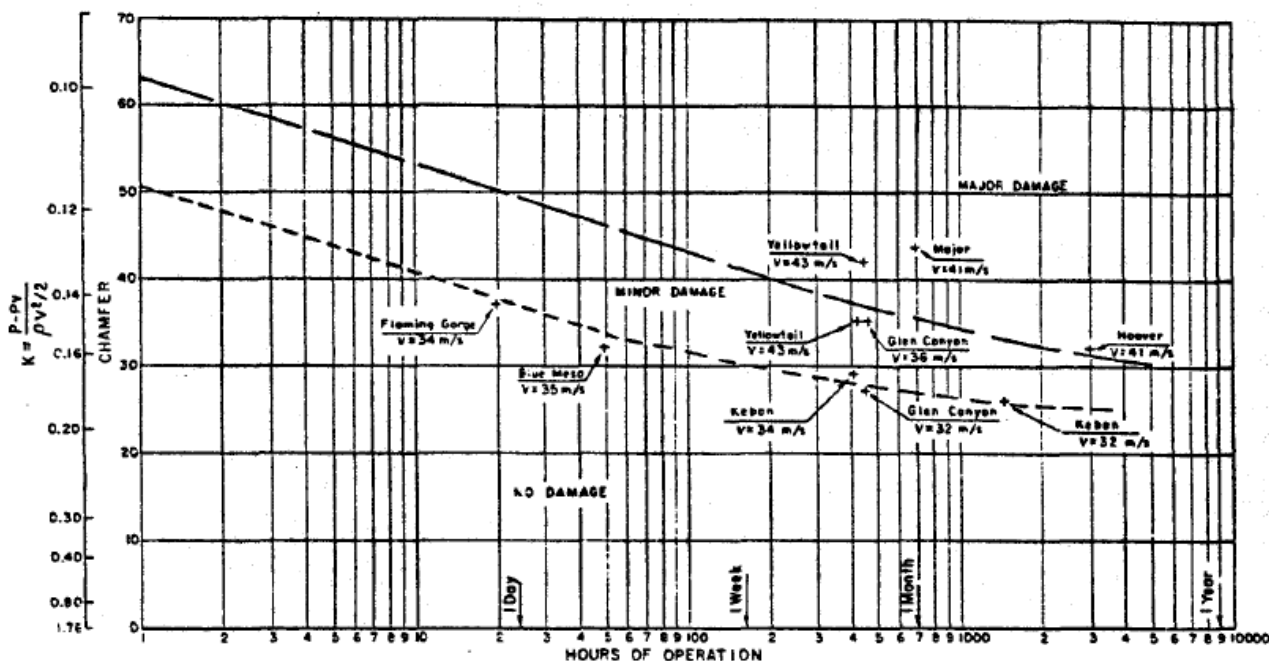


Figura 91.7- Danos causados por cavitação conforme Falvey, 1983.

Observando a Figura (91.7) de Falvey, 1983 podemos verificar que:

- Quando o index de cavitação é maior que 1,80, não é necessário nenhum proteção no escoamento.
- Entre index de cavitação de 0,17 a 0,25 a superfície deverá ser protegida.
- Quando o index de cavitação for menor que 0,12 provavelmente a superfície não precisará ser protegida.

Exemplo 91.1

Seja um dissipador de energia plano com dente de impacto com 2,00m de altura conforme Figura (91.8). A velocidade da água é de 9,1m/s e a pressão no ponto do dente é de 4,9mca.

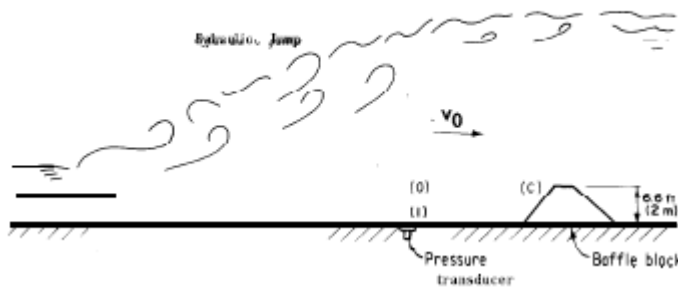


Figura 91.8- Dissipador de impacto com dente de altura 2,00m

$$\sigma_c = (y \cdot \cos \theta + y \cdot V^2 / gRc + p_b - p_v) / (V^2 / 2g)$$

Como temos um plano $Rc = \infty$ e portanto, $yV^2/gRc = 0$

$$\sigma_c = (y \cdot \cos \theta + p_b - p_v) / (V^2 / 2g)$$

$$\sigma_c = (y \cdot \cos \theta + 9,5 - 0,235) / (9,1^2 / 2 \times 9,81)$$

$$\theta = 0 \quad \cos \theta = 1$$

$$\sigma_c = (y + 9,5 - 0,235) / (9,1^2 / 2 \times 9,81)$$

$$\sigma_c = (y + 9,265) / 4,22$$

$$y = 4,9 \text{ mca} - 2,00 = 2,9 \text{ mca}$$

$$\sigma_c = (2,9 + 9,265) / 4,22 = 2,9$$

Consultando a Tabela (91.3) o valor de $\sigma = 2,3$ e como obtemos o valor 2,9 que é maior que 2,3 e supondo 100 horas de operação, entrando na Figura (91.7) verificamos que não haverá danos na estrutura.

Conforme Khatsuria, 2005 para prevenir danos devido a cavitação não devemos esquecer que devem ser considerados:

- Index de cavitação
- Vazão
- Velocidade
- Materiais de construção da superfície
- Tempo de exposição

Conforme Brito, 2011 na região de baixa pressão são geradas as cavidades (bolhas de vapor) que implodem quando atingem regiões de pressão mais elevada no escoamento. Ainda conforme Brito, 2001 algumas irregularidades de superfície é causa frequentes da ação erosiva da cavitação em vertedores conforme esquematicamente na Figura (91.10).

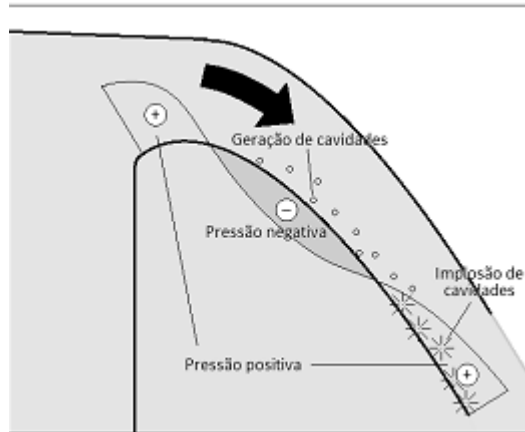


Figura 91.9- Esquema de geração de cavidades e sua implosão junto ao fundo de um vertedor. Fonte: Brito, 2011

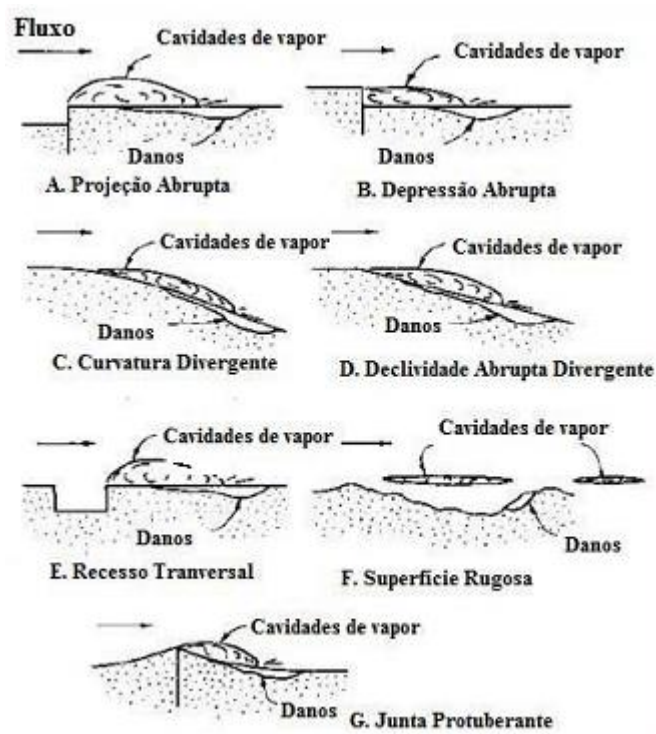


Figura 91.10- Classificação das irregularidades dos contornos sólidos e localização das áreas atingidas pela ação erosiva da cavitação. Fonte: Brito, 2011 com citação de Falvey, 1990.



Figura 1- Problemas causados pela cavitação. Fonte: Fema, 2010

91.4 Aeração induzida

Segundo Brito, 2011 a incorporação de ar na camada inferior do escoamento em altas velocidades em vertedores, protege as superfícies contra o dano de cavitação.

Segundo Falvey, 1990 velocidades superiores a 20m/s a 30m/s torna crítica a cavitação.

Peterka, 1953 citado por Brito, 2011 nos ensaios em laboratório verificou que quando a percentagem de ar é de 7% a 8%, praticamente foi eliminada a cavitação.

Então surgiu a ideia de se fazer aerador de fundo conforme Figura (91.11) e (91.12).

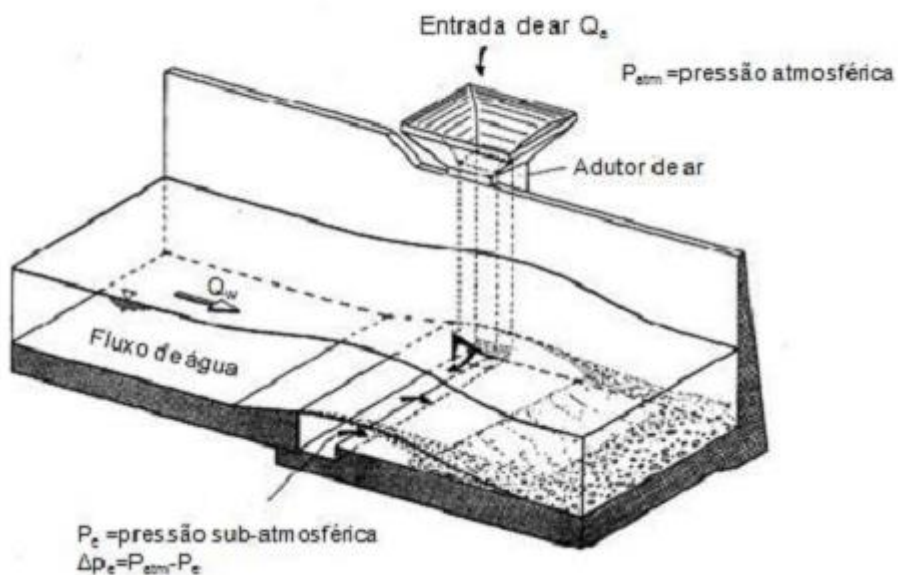


Figura 91.11- Geometria de um aerador de fundo. Fonte: Brito, 2011



Figura 91.12- Aplicação prática de um aerador de fundo em um canal do vertedouro, UHE Pedra de Cavallo. Fonte: Brito, 2011.

91.5 Abrasão

A erosão devido a abrasão é devida ao silte, areia, pedregulho, rochas, gelo e outros resíduos que atingem a superfície do concreto durante a operação da estrutura conforme se pode ver na Figura (91.13). A melhor solução é um concreto bem elaborado.

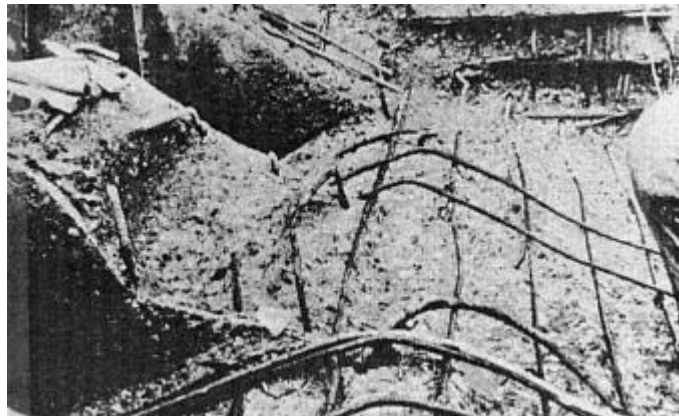


Figura 91.13- Abrasão do concreto em um dissipador de energia
Fonte: ACI, 1998

91.6 Ataque químico

O concreto feito com cimento Portland pode ser atacado por sais e ácidos causando efeitos deletérios a estrutura de concreto conforme ACI, 1998.

91.76 Erosão por diversas outras causas

ACI, 1998 cita outras causas de erosão em concreto, como acidez das águas, pH muito baixo, como por exemplo em torno de 5,0, ação de bactérias em climas quentes.

Em esgotos sanitários, o ácido sulfúrico causa muitos danos as estruturas de concreto.



Figura 2- Abrasão. Fonte: Fema, 2010



Erosão

Figura 3- Erosão e abrasão. Fonte: Fema, 2010



Figura 4-Abrasão. Fonte: Fema, 2010

91.8 Fadiga (Vibração)

A vibração pode causar fadiga no concreto. Não existem muitos estudos a respeito conforme ACI, 1998.



Figura 5-Efeito da vibração no concreto. Fonte: fema, 2010

Levantamento (Uplift): peso e estacas para evitar levantamento

91.8 Bibliografia e livros consultados

-ACI. *Erosion of concrete in Hydraulic Structures*. Reported by ACI Committee 210 em 1998. 22 páginas.

-BRITO, ROMUALDO JOSÉ ROMÃO. Análise da aeração em escoamentos de altas velocidades em calhas de vertedores. Mestrado, na Universidade de São Paulo –Escola de Engenharia de São Carlos, 2011, 91 páginas

-ELETROBRAS. *Critério de projeto de Usinas Hidrelétricas*, 279 páginas, outubro de 2003.

-FALVEY. HENRY T. *Prevention of cavitation on chutes and spillways*. Dezembro de 1983. 7 páginas.

-FEMA- Technical Manual: outlet works energy dissipators. Junho 2010, 555 páginas

-KHATSURIA, R.M. *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. New Yorkm, 2005, 649 páginas.