

**USINA DE TRAIÇÃO
A EVOLUÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)
NOS ÚLTIMOS 20 ANOS**

Corrado Piasentin

Marco Juliani
Liana Becocci

IEME BRASIL LTDA.

Carlos René Nunes Galvão Barreto

EMAE

RESUMO

A usina de Traição, localizada sobre o rio Pinheiros, foi construída no período de 1938-1940. Após alguns anos de operação, começou a apresentar fissuras, infiltrações e deformações no concreto, provocando inconvenientes na operação das máquinas. Em 1995, foi diagnosticada a presença da reação álcali-agregado (RAA), causando expansão no concreto da usina. A análise dos resultados da instrumentação instalada nos últimos 20 anos e os estudos conduzidos recentemente indicam que o fenômeno RAA já atingiu seu ápice e está em franco declínio. Foi estabelecido um programa de monitoração para continuar o acompanhamento do fenômeno e medidas de prevenção e reparo das regiões mais afetadas.

ABSTRACT

The Traição Dam, situated on the Pinheiros River in the city of São Paulo, was built in the period 1938 -1940. After a few years, cracks, leakage and deformations occurred in the concrete structures causing operational trouble. In 1995 the presence of the alkali-aggregate reaction AAR was diagnosed as the cause of the concrete expansion. The studies carried out recently and the review of the results of the monitoring instrumentation point out that the expansion of concrete structures caused by the AAR phenomenon has decreased in the recent years and the present rate of expansion is relatively

low. A program of monitoring is being implemented to follow up the phenomenon, and preventive and repair measures were recommended.

1 - INTRODUÇÃO

A Usina Elevatória de Traição foi construída no período de 1938-1940 e está situada no Canal Pinheiros, próxima à Ponte Cidade Jardim, em São Paulo (SP), dentro da zona urbana. A usina foi construída pela então Light e atualmente é operada pela EMAE.

Sua função básica é manter o controle de cheias, atender decretos de concessão, através do bombeamento d'água do canal inferior para o canal superior, com desnível nominal de 6 m e vazão máxima de 280 m³/s, bombeada através de 4 unidades Kaplan reversíveis, implantadas respectivamente em 1940, 1950, 1962 e 1977. Em seqüência, as águas do canal superior são novamente bombeadas pela Usina Elevatória de Pedreira para o Reservatório Billings, com desnível nominal de 25 m, viabilizando assim a geração de energia elétrica nas Usinas Henry Borden, em Cubatão, numa queda da ordem de 718 m.

A usina é uma estrutura de concreto de gravidade maciça (Figura 1), com altura máxima de 24 m, constituída de 4 blocos abrigando as quatro unidades, um bloco central com o descarregador de fundo (sangradouro), uma eclusa na direita hidráulica e a área de montagem na margem esquerda. Os blocos das unidades tem 13 m de largura e o do sangradouro 6,80 m.

As fundações (Figuras 2 e 3) são constituídas de silte arenoso a argiloso compacto, solos residuais produtos da alteração de rocha magmática. A rocha são mergulha em direção à ombreira leste (direita), sendo encontrada na profundidade de 4 m na ombreira oeste e 22 m na ombreira leste. O trecho das fundações com características menos favoráveis situa-se em correspondência à margem direita, onde há aluviões recentes.

Os extensômetros verticais simples e múltiplos instalados nas estruturas, os quais permitiram medir as expansões do concreto e os recalques nas fundações, são mostrados nas Figuras 1, 2 e 3.

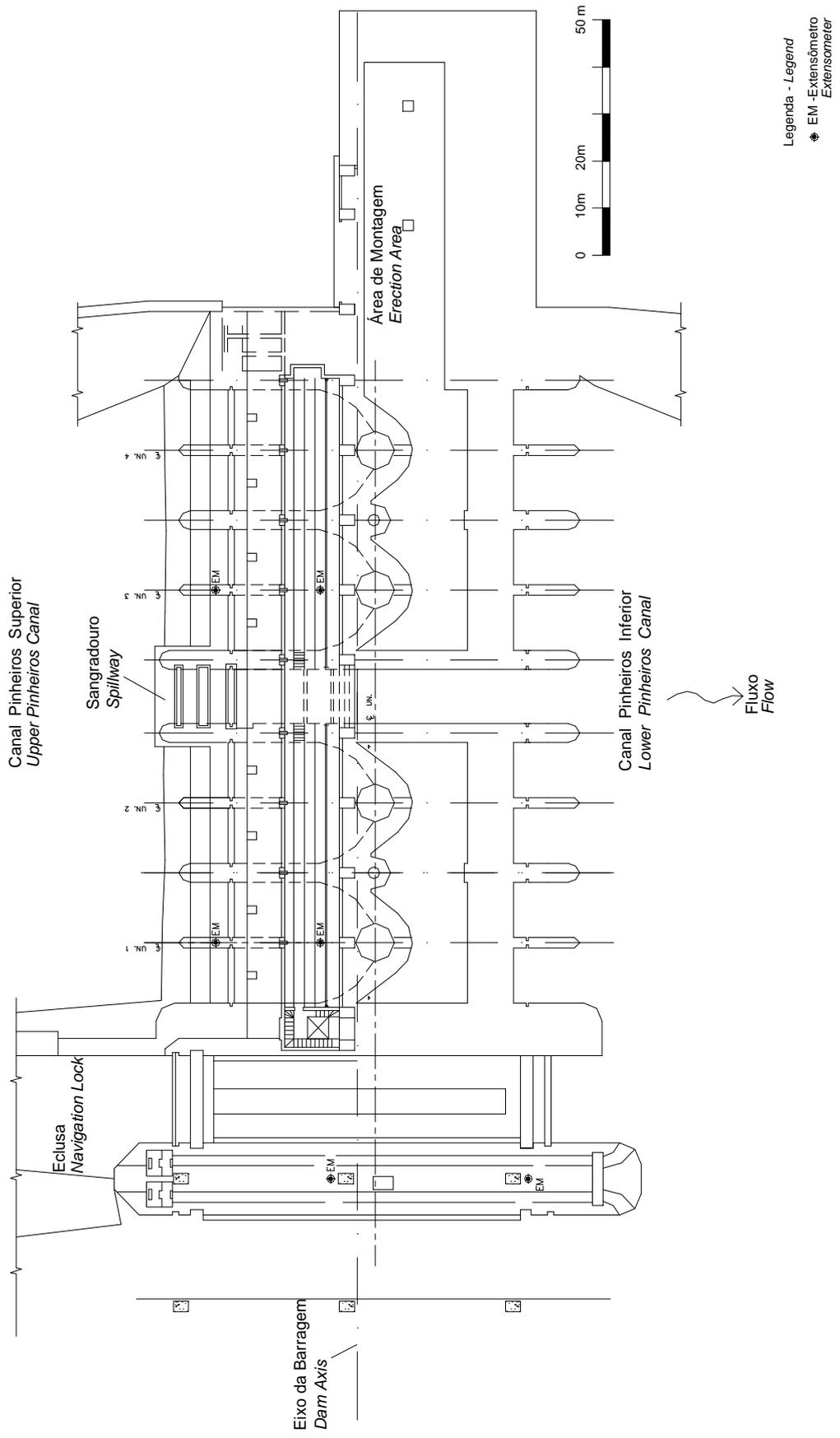


FIGURA 1 – Usina de Tração - Planta

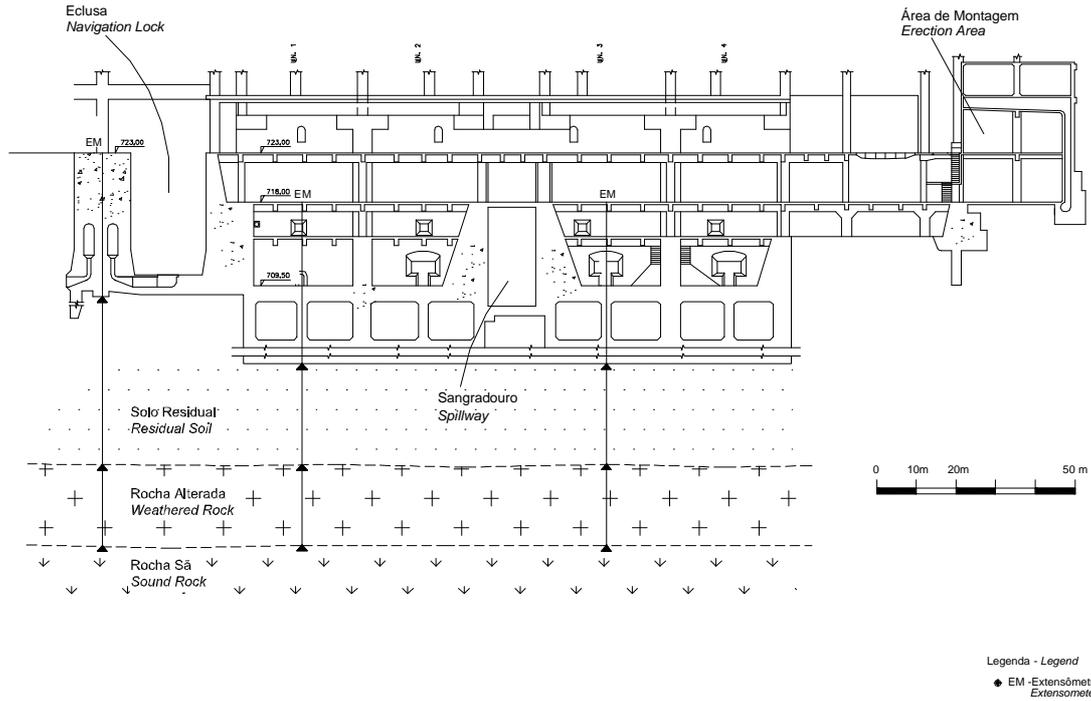


FIGURA 2 – Usina de Tração – Seção Longitudinal

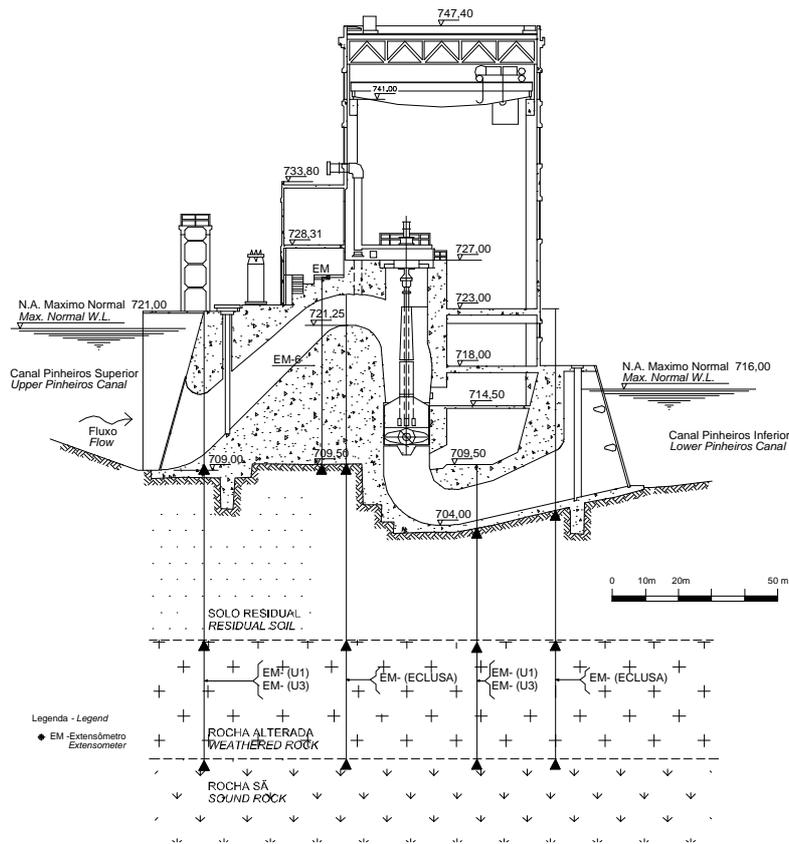


FIGURA 3 – Usina de Tração – Seção Transversal

2 - ANTECEDENTES

2.1 - PROBLEMAS OCORRIDOS

Desde os primeiros anos de operação, foram registrados problemas mecânicos, na maioria dos casos desalinhamentos sucessivos no eixo principal das bombas, localizados principalmente na unidade 1 na margem leste. Posteriormente, ocorreram fissuras, trincas e infiltrações no concreto. Os problemas foram atribuídos inicialmente aos recalques diferenciais da fundação, à má qualidade da água do canal, às vibrações e cargas provocadas pela operação das unidades, e até mesmo à suposta atividade sísmica.

A análise da documentação disponível revelou também:

- Frequentes quebras dos parafusos que prendem o anel do rotor da unidade 1 à sede, chumbada no concreto;
- Trincas generalizadas no difusor da unidade 1, obrigando à sua substituição;
- Ovalização do poço da unidade 1 (3 mm), com os problemas de travamento do anel difusor, rompimento dos parafusos de fixação ao concreto, fissuração do anel periférico do rotor (anel de desgaste);
- Em pelo menos duas ocasiões comprovadas (1970 e 1994), a operação de montagem do rotor da unidade 1 foi prejudicada pela mudança relativa de posição do fio de prumo empregado para alinhar o eixo da bomba, provavelmente ocasionados por deformações na estrutura durante operações da ponte rolante e da eclusa;
- Aquecimento e desgaste assimétrico dos mancais-guia do motor-gerador;
- Travamento da porta de aço da oficina mecânica, provocado provavelmente por distorção das estruturas de concreto;
- Aumento das infiltrações através das tampas de inspeção das turbinas e das tampas dos "shaft-guard", causando vazamentos da água de refrigeração dos mancais.

Os testes realizados para uma avaliação quantitativa destas influências consistiram em sucessivas operações de carregamento - descarregamento da eclusa, e também testes de carregamento da ponte rolante, através do estacionamento de carga definida em pontos pré determinados da superestrutura, acompanhando-se a sua influência sobre os deslocamentos da estrutura, fundação e sobre os equipamentos mecânicos.

Contudo, os testes de carregamento não reproduziram o fenômeno de deslocamento do fio de prumo e a instrumentação instalada acusou apenas pequenas variações devido ao ciclo diário de temperaturas.

A análise dos aspectos geológicos e geotécnicos das fundações revelou que os recalques ocorridos ao longo do tempo compreendido dentro dos últimos 10 anos apresentaram valores modestos, na dimensão de milímetros, com tendência para a estabilização. Portanto os problemas relacionados com o comportamento das estruturas e funcionamento dos equipamentos da Usina

não podem ser exclusivamente relacionados com o assentamento das fundações.

2.2 - DIAGNÓSTICO DA REAÇÃO EXPANSIVA

As reações expansivas do concreto foram confirmadas em 1995 através de análise petrográfica-mineralógica dos testemunhos extraídos do concreto.

A observação macroscópica dos testemunhos evidenciou a presença de bordas difusas no contato pasta/agregado, com cor esbranquiçada e 1-2 mm de espessura, agregados provenientes de rochas intensamente deformadas após a cristalização (milonitos), classicamente reativos.

A análise microscópica indicou as seguintes características principais:

- A porosidade está em torno de 1-2 %, com até 10 mm de extensão; vazios raros, preenchidos por minerais secundários esbranquiçados - etringita, gel alcalino gretado (raro), hidróxido de cálcio, gel cálcio alcalino branco;
- O agregado predominante corresponde a rochas submetidas a forte deformação, cisalhamento e recristalização de minerais posteriores à cristalização primária (blastomilonito de rocha granítica a granodiorítica), subordinadamente ocorrem agregados provenientes de gnaisses;
- O agregado apresenta vários componentes potencialmente geradores de reações álcali-silicato: quartzo deformado, feldspatos deformados pertíticos e porções microgranuladas;
- As fraturas possuem comprimento máximo de 20mm e espessura estimada em até 0,02 mm;
- O gel alcalino também preenche fraturas no agregado, consistindo na feição mais típica da reação expansiva; a cor é clara a pardacenta, pouco cristalizado e às vezes coliforme; observou-se a passagem de gel alcalino para etringita acicular.

As análises confirmaram, portanto, que nas estruturas da Usina de Traição ocorre um fenômeno de RAA, no caso reatividade álcalis-silicato, envolvendo especificamente o quartzo deformado como mineral reativo, caracterizando uma reação do tipo lento.

3 - INSTRUMENTAÇÃO DE AUSCULTAÇÃO

Os primeiros instrumentos na Usina Elevatória de Traição foram alguns marcos de nivelamento topográfico instalados sobre a parede sul, cujas leituras eram realizadas a partir de estações topográficas localizadas próximos ao canal do Rio Pinheiros. Estas medições tiveram início em novembro de 1980, sendo as leituras realizadas pela equipe de topografia da EMAE (na época Eletropaulo).

Em 1983, o I.P.T. realizou cinco sondagens de prospecção nas ombreiras da referida usina, tendo aproveitado quatro delas para a instalação de medidores de nível d'água, sendo dois na ombreira direita e dois na esquerda. Nesta época foram instaladas também algumas bases de Tensotast nas fissuras observadas no concreto, porém as mesmas tiveram caráter provisório.

No segundo semestre de 1985, a instrumentação de auscultação da usina foi complementada pelos seguintes aparelhos, segundo projeto elaborado pela Promon:

- 3 extensômetros de hastes múltiplas (3 hastes cada);
- 5 piezômetros de fundação tipo “standpipe”;
- 4 medidores triortogonais nas juntas de contração entre blocos;
- 16 medidores triortogonais nas principais fissuras do concreto.

Em 1999, alguns extensômetros de hastes múltiplas e medidores triortogonais foram substituídos, devido ao estado avançado de corrosão de suas partes metálicas. Portanto, a instrumentação de auscultação constava, em 2000, dos seguintes aparelhos:

- 6 extensômetros múltiplos verticais com 3 hastes;
- 2 extensômetros simples verticais;
- 5 extensômetros horizontais;
- 8 bases de convergência;
- 19 medidores triortogonais.

4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - MEDIDORES TRIORTOGONAIIS NAS FISSURAS

Todos os 15 medidores triortogonais instalados nas fissuras indicam estabilização ou abertura com uma única exceção. As fissuras indicam em geral uma abertura variando de 0 até 0,25 mm/ano (valor médio de 0,09 mm/ano) com tendência a estabilização nos últimos anos.

4.2 - MEDIDORES TRIORTOGONAIIS NAS JUNTAS DE CONTRAÇÃO

As juntas de contração transversais estão situadas no piso das lajes das El. 718 e 723 entre o bloco U2 e o descarregador de fundo e entre o bloco U4 e a área de montagem. Com uma única exceção, todos os 4 medidores indicam abertura da juntas de contração com valores máximos da ordem de 2 mm.

A taxa média de abertura das juntas varia entre 0,08 e 0,25 mm/ano entre janeiro de 1995 e janeiro de 2000.

4.3 – PIEZÔMETROS

Os piezômetros indicam quedas abruptas de subpressões em correspondência aos períodos de manutenção das unidades quando elas são esvaziadas. Este fenômeno no passado pode ter induzido recalques na fundação.

4.4 - EXTENSÔMETROS

Os recalques das fundações nos últimos 3 anos estão em geral estabilizados indicando apenas recalques inferiores ao milímetro em dois instrumentos localizados na ombreira direita (eclusa e bloco 1).

Os extensômetros horizontais, embutidos no concreto, foram instalados no início de 2000 e com 3 anos de funcionamento indicam principalmente as variações sazonais e pequenas expansões na direção horizontal com a única exceção dos blocos 3 e 4 onde foi registrada uma dilatação de 1mm, equivalente a uma taxa de 21 microdeformações/ano na direção do eixo da usina.

4.5 - ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES DO CONCRETO AO LONGO DOS ANOS

Foi realizada uma análise das deformações do concreto ao longo da vida da usina, incluindo os resultados dos marcos de nivelamento instalados na El. 727 m e todos os extensômetros verticais, antigos e novos. Os resultados estão resumidos na Tabela 1, a seguir, onde são fornecidas as taxas médias de deformação em microdeformações/ano por bloco e por período de observação.

TABELA 1 - Taxas médias de deformação em microdeformações/ano

Período	Eclusa	U1	U3	U4	Media
Dez80/Out84	-	69*	-	25*	47
Dez85/ Set92	-	42*	-	15*	28,5
Out85/Out94	29**	34**	58**(?)	-	40
Jan95/Out99		23**	23**		23
Ago96/Ago99	13**				13
Jan00/Fev03	4**	12**	21 **	-	12

* Marcos de nivelamento

** Extensômetros

(?) Resultado duvidoso

Estes resultados indicam uma tendência de decréscimo das deformações constante e coerente em todos os blocos.

Os valores das expansões totais acumuladas no concreto desde a instalação medidos nos EM-01 e 02 são da ordem de 400 microdeformações.

Na Tabela 2 foram calculados os valores médios das taxas de expansão e atribuídas ao ano situado no meio do período correspondente. Os valores máximos e mínimos estão também indicados.

TABELA 2 - Valores médios das taxas de expansão

Ano médio	Taxa de expansão ($10^{-6}/\text{ano}$)		
	média	máxima	mínima
1982	47	69	25
1988	28,5	42	15
1989	31,5	34	29
1997	23	23	23
1998	13	13	13
2002	12,5	21	4

Os valores desta tabela são mostrados no gráfico da Figura 4, onde a reta de tendência dos valores médios indica claramente o decréscimo da taxa de expansão do concreto com valores atuais abaixo de $20 \times 10^{-6}/\text{ano}$.

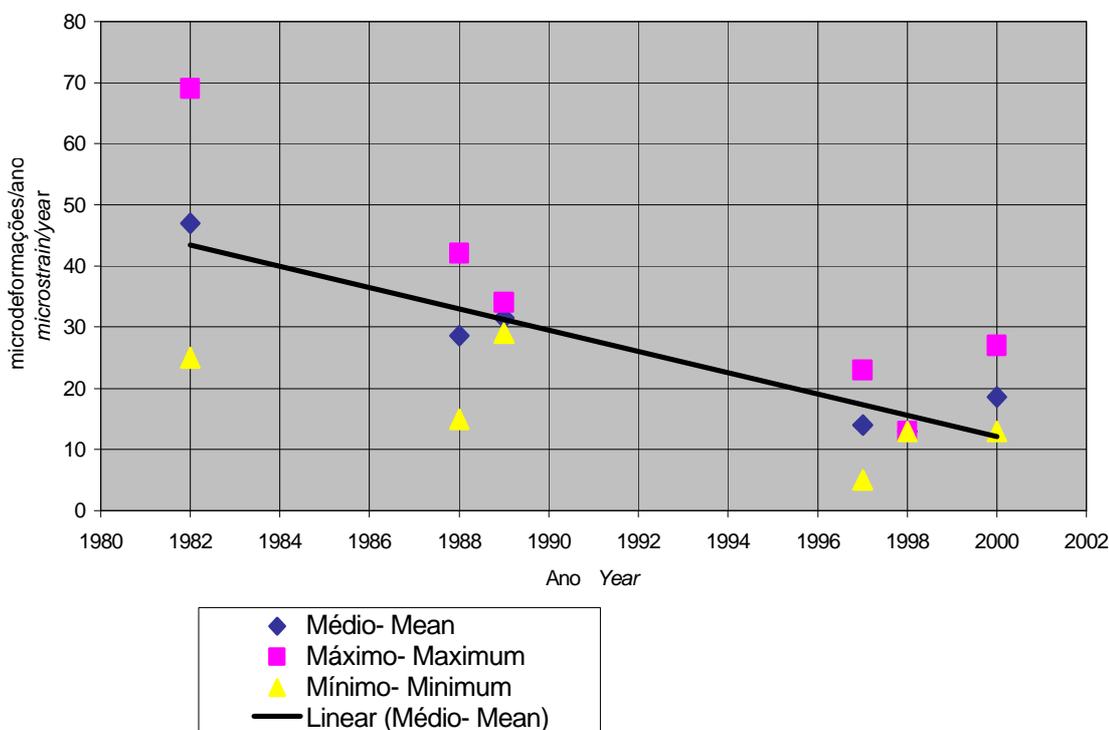


FIGURA 4 – Taxa de expansão do concreto

5 - OUTRAS INVESTIGAÇÕES

5.1 - MAPEAMENTO DAS FISSURAS

Foram realizados mapeamentos das fissuras em janeiro de 1995 e agosto de 1999. A análise quantitativa destas fissuras indica que:

- A grande maioria das fissuras é anterior a 1995;
- Todas as fissuras novas têm abertura inferior a 0,5 mm;
- O maior número de fissuras está localizada nas paredes especialmente naquela de jusante;
- O maior número de fissuras novas apareceram nos pisos, com maior incidência nos pisos inferiores, diminuindo no sentido ascendente.

Quanto à localização e tipo de fissuras, foi constatado o seguinte:

- As fissuras nas paredes são mais freqüentes nas cotas inferiores;
- As fissuras nas paredes dos pisos inferiores são em predominância subhorizontais;
- As fissuras nas cotas superiores são horizontais e verticais e algumas inclinadas a 45°.

A partir das observações acima, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- O fenômeno de fissuramento está em franco decréscimo;
- O padrão das fissuras, na maioria subhorizontais nas cotas inferiores sugere uma maior dilatação na base do corpo da usina, provocando tensões de tração nas paredes inferiores;
- As fissuras inclinadas indicam recalques ou deformações diferenciais causadas pelas fundações ou por diversas taxas de dilatação por RAA em função das diferentes dimensões dos vários elementos das estruturas.

5.2 - DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES NO CONCRETO

As tensões existentes no concreto foram determinadas por meio de ensaios efetuados com mini-macaco plano em seis locais da galeria da El.709,50 m. Os resultados variam entre 0,06 e 2,32 MPa e não foram considerados conclusivos devido às grandes variações encontradas.

5.3 - AMOSTRAGEM DO CONCRETO

Os ensaios de laboratório efetuados nos testemunhos de 15 cm de diâmetro retirados por meio de perfurações rotativas mostraram que o concreto tem propriedades normais com valores médios de resistência a compressão simples de 35,2 MPa, variando entre 47,3 e 21,8 MPa.

6 - CONCLUSÕES

Os estudos e investigações realizadas indicam que o cenário das fissuras deve ter sido provocado pelas seguintes razões:

- Primeiro por expansão do corpo da usina, provocado pela RAA durante vários anos;
- Segundo e em menor importância pelos recalques diferenciais entre a eclusa e as estruturas das unidades adjacentes, devido ao aumento significativo na espessura da camada de solo residual ao longo do eixo longitudinal da usina, que ocasionaram concentração de tensões em certas regiões.

A ocorrência da reação álcali-agregado está bem evidenciada pelos testes petrográficos de laboratório.

Os fenômenos de reatividade, provocando a expansão dessas estruturas de concreto, explicam muitos dos problemas observados nas mesmas e nos equipamentos instalados.

O fenômeno de reatividade, caracterizado por uma reação do tipo lento, não afetou significativamente a qualidade do concreto, pois:

- As perfurações efetuadas e os ensaios de laboratório mostraram que o concreto tem propriedades normais similares aos outros concretos fabricados na região;
- As fissuras são isoladas, preferencialmente subhorizontais ou subverticais e não do tipo ramificado característico de uma reação muito pronunciada.

A análise dos resultados da instrumentação e do mapeamento das fissuras sugere que a expansão nas estruturas está desenvolvendo-se de forma anisotrópica, pois os extensômetros verticais indicam deslocamentos causados por dilatação do concreto enquanto que os extensômetros horizontais, as juntas de dilatação transversais entre blocos e a grande maioria das fissuras nas lajes dos pisos não evidenciam expansões.

Há várias indicações de que o fenômeno RAA está em franco declínio:

- Ausência, na atualidade, de problemas na operação das máquinas que haviam sido freqüentes no passado;
- Diminuição na ocorrência de fissuras novas, conforme verificado pela comparação entre o mapeamento de 1995 e 1999;
- Decréscimo na taxa de aumento das microdeformações conforme resultados da instrumentação, tendo chegado a valores médios abaixo de 20 microdeformações/ano, considerada baixa;
- O baixo teor de álcali verificado nas amostras do concreto;
- A presença do mineral (etringita), detectado pela análise mineralógica, que indica a estabilização dos fenômenos expansivos.

7 - RECOMENDAÇÕES

Os tratamentos recomendados são os seguintes:

- Injeção com resina epoxídica das fissuras nas lajes ou onde pode haver implicações estruturais;
- Injeção com poliuretano das fissuras com infiltrações;
- Impermeabilização das áreas com infiltrações por meio de injeção com poliuretano ou tratamento de impermeabilização superficial;
- Canalização da vazão remanescente.

A parede da eclusa deverá ser tratada para eliminar as infiltrações para o interior da unidade 1. As fissuras que deverão ser tratadas são aquelas com abertura > 0,3 mm em presença de armadura ou com abertura > 0,5 mm sem armadura, especialmente nos ambientes considerados mais agressivos, como nas galerias das El.709,50 m e 718 m dos pisos inferiores com umidade alta. Os tratamentos deverão ser realizados preferencialmente durante a estação fria quando as aberturas são máximas, facilitando assim a injeção.

8 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a EMAE a autorização para publicar este trabalho.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Oliveira Guerra M. et alii. Aspectos da reatividade alcali-agregado na usina elevatória de Traição. Simpósio sobre reatividade alcali-agregado em estruturas de concreto. Novembro de 1997

