

# DESEMPENHO DE ARGAMASSAS REPARADORAS PARA SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS DA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU BINACIONAL

Alcione de Abreu (1)  
Juliana Fenner Ruas Lucas (2)  
Gilmar Fabro (3)  
Leonilda Correia dos Santos (4)  
Nora Díaz Mora (5)

## RESUMO

O desgaste da superfície de concreto em estruturas hidráulicas ocorre principalmente por erosão, cavitação e ataques químicos. Além disso, na aplicação do concreto na construção de grandes barragens, a excessiva quantidade de calor de hidratação do cimento, gerado no maciço, pode acarretar problemas na estabilidade da obra. Através do monitoramento realizado pelo Laboratório de Tecnologia do Concreto nas estruturas relevantes da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHI), tem-se constatado o aparecimento de perfurações sucessivas no concreto, surgindo a necessidade de ações corretivas, como a aplicação de argamassas reparadoras. Neste trabalho, realizou-se um estudo comparativo do comportamento mecânico e da deterioração de argamassas cimentícias e epoxídicas em função da composição com a finalidade de definir qual a mais eficiente para reparos. Uma vez selecionadas as composições das argamassas em função da resistência mecânica, corpos de prova foram moldados para ataques em meios químicos: solução de ácido nítrico e de ácido sulfúrico, e em meios microbiológicos: água deionizada estéril, soluções concentradas de bactérias heterotróficas e de fungos filamentosos. Após os ataques químico e microbiológico, realizou-se o ensaio de ruptura por compressão axial dos corpos de prova para avaliar a diminuição de resistência. Para a análise da deterioração após o ataque químico, foi calculada a perda de massa e foi feita a análise qualitativa dos produtos da lixiviação das argamassas. Para o ataque microbiológico, além do cálculo da perda de massa das argamassas, realizou-se a quantificação e qualificação de bactérias heterotróficas e fungos filamentosos presentes nas soluções concentradas e na água deionizada estéril. Com os resultados obtidos nesse trabalho, os autores esperam contribuir com o setor de manutenção da barragem da UHI quanto à aplicação de uma argamassa mais adequada para os reparos dos problemas de fissuração presentes no vertedor.

## 1 INTRODUÇÃO

---

(1) Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Acadêmico de Engenharia Mecânica

(2) União Dinâmica de Faculdades Cataratas - UDC, Acadêmica de Engenharia Civil

(3) Itaipu Binacional - Laboratório de Tecnologia do Concreto, Técnico de Ensaios Especiais

(4) Itaipu Binacional - Laboratório Ambiental, Farmacêutica e Bioquímica

As estruturas de concreto devem desempenhar as funções que lhe foram atribuídas e manter a resistência e utilidade delas esperadas, no período de vida previsto. Para tanto, devem suportar o processo de deterioração ao qual estarão sujeitas ao longo da sua vida útil, conforme menciona Villalba et al (2002). De acordo com Kormann et al (2003), o desgaste apresentado por estruturas hidráulicas de concreto, especialmente de usinas hidrelétricas, tem sido causa de preocupação constante das empresas proprietárias destes empreendimentos. Dentre os problemas encontrados destacam-se as erosões superficiais, ocasionadas por abrasão e por cavitação hidráulica.

Segundo Kormann et al (2001), a abrasão é um processo de desgaste que ocorre quando partículas são transportadas pela água e entram em choque com a superfície de concreto. Este impacto gera atrito, esfolamento e ranhuras na superfície, causando fissuras, agravando a extensão de prováveis microfissuras já existentes na pasta de cimento e deixando aparentes os agregados graúdos. Apesar dessas avarias, as regiões afetadas pela abrasão apresentam aparência lisa. Esta ação é de difícil avaliação, visto que existem diferentes variáveis envolvidas, como a qualidade do concreto, os tipos de partículas transportadas, quantidade, dureza e tamanho das mesmas. A cavitação hidráulica acontece quando bolhas de vapor se formam devido a quedas localizadas de pressão a valores abaixo da pressão de vapor da água, à temperatura ambiente. Na correnteza, quando ocorre um aumento localizado de pressão, as bolhas explodem causando um grande impacto. A água, então, ocupa o lugar antes ocupado pelas bolhas, escoando em alta velocidade, surgindo assim pressões ainda mais altas em áreas muito pequenas. A ação desse fenômeno repetidamente sobre uma região ocasiona o desgaste superficial. A ocorrência da cavitação é facilitada pela presença de ar e de partículas de poeira que também fixam ar não dissolvido na água. Diferente da superfície deteriorada por abrasão, a cavitação torna a superfície bastante irregular.

Além dos problemas de deterioração do concreto decorrentes da utilização da estrutura, deve-se também considerar as dificuldades construtivas que influenciam nesse processo de degradação. Na aplicação do concreto em estruturas hidráulicas do tipo barragem, devido às grandes dimensões dos blocos envolvidos na construção da obra, gera-se uma excessiva quantidade de calor durante a hidratação do cimento que apresenta grande dificuldade de ser dissipada. O aumento inicial da temperatura do bloco acarreta sua dilatação, originando uma pré-compressão no mesmo. Porém, as sucessivas quedas de temperatura provocam uma descompressão gradativa que pode ser superior a pré-compressão inicial, causando zonas localizadas de tração excessiva no maciço de concreto, que levam ao surgimento de microfissuras indesejáveis, de acordo com Abreu et al (2006).

De acordo com Shirakawa et al (1997), a biodeterioração do concreto é um fenômeno no qual a atividade metabólica e o crescimento de microrganismos em regiões localizadas do concreto pode levar à produção de ácidos e, por conseguinte propiciar a dissolução de compostos hidratados do cimento. As bactérias heterotróficas iniciam o processo de deterioração, nutrindo-se de lignossulfonatos utilizados como aditivos e de compostos orgânicos de poeiras

impregnadas no concreto. O crescimento das bactérias heterotróficas forma microrregiões anaeróbicas, onde as bactérias redutoras de sulfato desenvolvem-se produzindo  $H_2S$ ; em etapa posterior o *Thiobacillus thioparus* oxida o  $H_2S$  produzindo  $H_2SO_4$ . As bactérias mais agressivas são aquelas pertencentes ao gênero *Thiobacillus*, pois, no processo de oxidação biológica de formas reduzidas de enxofre inorgânico, geralmente produzem ácido sulfúrico como produto final de seu metabolismo, conforme Shirakawa et al (1997).

Outra fonte comprovada de ataque ambiental por ácidos agressivos à estrutura de concreto é a chuva ácida. A queima de carvão e de combustíveis fósseis e os poluentes industriais lançam dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio na atmosfera. Esses gases combinam-se com o hidrogênio presente na atmosfera sob a forma de vapor de água, formando ácido sulfúrico e ácido nítrico que precipitam junto com as águas da chuva, que ao caírem na superfície, alteram a composição química do solo e das águas.

O Laboratório de Tecnologia do Concreto da Itaipu Binacional realiza inspeções freqüentes e periódicas das estruturas relevantes na segurança da barragem. Como resultado desse monitoramento, mesmo sendo verificado que o envelhecimento do concreto utilizado encontra-se dentro dos parâmetros de normalidade, tem-se constatado o aparecimento de perfurações sucessivas no concreto decorrentes de pontos tracionados associados aos problemas de abrasão, surgindo a necessidade de ações corretivas, como a aplicação de argamassas reparadoras.

Considerando que obras de grandes barragens, pelas suas características, exigem uma particular atenção no que diz respeito à segurança, estabilidade e funcionalidade, prevenção e correção de problemas devido à existência de um risco potencial de possibilidade de falha, mesmo adotando-se todos os procedimentos corretos de manutenção, conforme menciona Santos et al (2007), torna-se relevante o estudo de materiais de reparo que apresentem desempenho satisfatório para os tipos de solicitações e exposições às quais essas estruturas ficam submetidas, segundo Kormann et al (2001). Assim, diversos materiais e misturas vêm sendo testados, principalmente, em reparos de estruturas hidráulicas sujeitas à erosão por abrasão, tais como as superfícies de vertedouros, blocos de dissipação e muros laterais das regiões das comportas das barragens de concreto das usinas hidroelétricas, como indica Leonardo et al (2002).

No trabalho desenvolvido por Kormann et al (2002), realizou-se a comparação de quatro materiais diferentes para reparo do vertedouro da Usina Hidrelétrica Capivara, localizada no rio Paranapanema, na divisa entre os municípios de Taciba (SP) e Porecatu (PR). Em seu estudo, os autores utilizaram: argamassa com sílica ativa, argamassa epoxídica, argamassa polimérica e concreto com fibras de aço. Foram realizados ensaios de resistência de aderência à tração, resistência à abrasão, resistência à compressão axial simples, módulo de deformação elástica, ensaio de permeabilidade e de envelhecimento acelerado. Considerando todas essas propriedades mensuradas e a aplicação prática em campo, o melhor desempenho observado foi o da argamassa epoxídica. O traço desta argamassa variou numa proporção de 1 de resina para 4,5 a 5 de areia, em massa. Salles (2000 apud KORMANN et al, 2001) aplicaram resina

epóxi para a recuperação de trincas e erosão localizadas, principalmente nas juntas das lajes do rápido do vertedouro, muros laterais e pilares de sustentação das comportas da UHE Escola de Engenharia Mackenzie. Os reparos foram efetuados em duas etapas, anos 1984 e 1997. A recuperação na primeira etapa envolveu argamassa de resina epóxi nos traços resina : areia de 1 : 5 e 1 : 6 e, na segunda etapa, argamassa epoxídica no traço epóxi : cimento : areia de 1 : 1 : 3, em massa.

Na literatura, também são encontrados trabalhos que avaliam o desempenho de materiais para reparos à base de cimento. No trabalho desenvolvido por Leonardo et al (2002), são estudados nove traços de concreto de alto desempenho (CAD) em relação a um traço em concreto convencional (CCV), normalmente utilizado em reparos de superfícies hidráulicas erodidas de barragens. Nos traços iniciais, a proporção de sílica foi de 10% em relação ao peso do cimento, aditivo superplastificante variando de 0,0178 a 0,0361kg e fator água/cimento (a/c) nas relações de 0,28, 0,30, 0,32, 0,34 e 0,40. Para aumentar a trabalhabilidade resultante, o traço de melhor desempenho foi alterado em relação ao seu teor de pasta em até 15%. Dos resultados obtidos, selecionou-se a composição CAD com relação água/cimento de 0,32 como a de melhor desempenho geral e, após incremento do teor de pasta da mistura, a composição contendo 10% a mais de pasta.

Desde o início da operação das primeiras turbinas da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional (UHI), a empresa vem realizando pesquisas sobre materiais de reparo para manutenção das estruturas de concreto de sua barragem. Para contribuir com essas pesquisas, neste trabalho foi realizado, juntamente com o Laboratório Ambiental e Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu Binacional, um estudo comparativo, a nível de laboratório, para avaliar o desempenho mecânico e deteriorativo de argamassas cimentícias e epoxídicas em função da composição.

Para tanto, foram produzidos corpos de prova de diferentes composições de argamassa cimentícia e epoxídica para otimização do traço das mesmas em função da resistência mecânica. Uma vez que os traços foram definidos, corpos de prova foram moldados para serem imersos em meios químicos: solução de ácido nítrico e solução de ácido sulfúrico (meios agressivos conforme Delvecchi et al (2004)) e em meios microbiológicos: água deionizada estéril, solução concentrada de bactérias heterotróficas e solução concentrada de fungos filamentosos. Após 30 dias de ataque químico e 60 dias de ataque microbiológico, realizou-se o ensaio de ruptura por compressão axial dos corpos de prova para avaliar a perda de resistência de ambas as argamassas devido aos ataques. Para a análise da deterioração após o ataque químico, foi calculada a perda de massa e foi feita a análise qualitativa dos produtos da lixiviação das argamassas. Para o ataque microbiológico, além do cálculo da perda de massa das argamassas, realizou-se periodicamente a quantificação e qualificação de bactérias heterotróficas e fungos filamentosos presentes nas soluções concentradas e na água deionizada estéril. Com os resultados obtidos nesse trabalho, os autores esperam contribuir com o setor de manutenção da barragem da UHI, fornecendo dados relevantes que auxiliem na tomada de decisão quanto à aplicação de uma argamassa mais adequada para os reparos dos problemas de fissuração presentes no vertedor.

## 2 OBJETIVOS

- Definir a composição de argamassa cimentícia mais eficiente para reparos em superfícies hidráulicas construídas em concreto de resistência de 35MPa utilizando como parâmetro de análise a resistência mecânica no ensaio de compressão axial.
- Definir a composição de argamassa epoxídica mais eficiente para reparos em superfícies hidráulicas construídas em concreto de resistência de 35MPa utilizando como parâmetro de análise a resistência mecânica no ensaio de compressão axial.
- Analisar o comportamento mecânico e deteriorativo das argamassas cimentícias e epoxídicas selecionadas.
- Fornecer parâmetros relativos à composição de argamassa epoxídica e cimentícia que permitam contribuir com as ações de manutenção em empresas do setor elétrico.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Definição de composições otimizadas de argamassas

#### 3.1.1 Determinação de propriedades da resina epóxi

Para definir as propriedades da resina epóxi a ser utilizada na preparação da argamassa epoxídica, sendo esta bicomponente (A - 690g de resina epóxi e B - 210g de poliamina), determinou-se a densidade e a viscosidade imediatamente após a mistura dos dois componentes. A densidade da resina foi obtida através do uso de psicrômetro. Para determinar a viscosidade da resina epóxi, utilizou-se viscosímetro rotativo analógico pertencente ao Laboratório de Tecnologia do Concreto da UHI.

Para a determinação da resistência mecânica da resina epóxi, moldou-se 8 corpos de prova (fotografia I), com dimensões de 5cm de diâmetro por 10cm de altura, para a realização de ensaio de ruptura por compressão axial aos 1, 3, 7 e 28 dias, sendo 2 corpos de prova a serem rompidos para cada idade.



Fotografia I - Corpos de prova de resina epóxi e argamassas epoxídicas.

### 3.1.2 Preparação dos corpos de prova de argamassa epoxídica

Determinadas as propriedades da resina epóxi, procurou-se definir as composições de argamassa epoxídica a serem produzidas. Com os dados levantados na bibliografia e a experiência dos técnicos do Laboratório de Tecnologia do Concreto da UHI, estipulou-se as composições de argamassa epoxídica a serem investigadas, conforme tabela I, sendo que foram utilizados cimento Portland CII 32F, areia do Rio Paraná com módulo de finura igual a 1,70 e a resina epóxi anteriormente analisada.

Tabela I - Composições de argamassa epoxídica.

Traço	Resina (kg)	Cimento (kg)	Areia (kg)
TAE1	1	2	-
TAE2	1	3	-
TAE3	1	-	2
TAE4	1	-	3
TAE5	1	-	4
TAE6	1	-	5
TAE7	1	-	6
TAE8	1	-	7

Houve a impossibilidade de produção de corpos de prova de argamassa epoxídica (com cimento) com mais de 3kg de cimento, pela não trabalhabilidade adquirida acima dessa proporção. Esse fato decorre da absorção da resina pelo cimento, dificultando a compactação.

Para cada composição de argamassa epoxídica, moldou-se 8 corpos de prova (fotografia I) com dimensões de 5cm de diâmetro por 10cm de altura, segundo a norma NBR-5738, para a determinação da resistência mecânica aos 1, 3, 7 e 28 dias, totalizando 64 corpos de prova.

### 3.1.3 Determinação de propriedades dos corpos de prova de argamassa epoxídica

Confeccionados os corpos de prova de argamassa epoxídica, foi estimada a densidade das diferentes composições produzidas através da medida do volume e da massa de cada corpo de prova. Para a determinação da resistência mecânica, submeteu-se os corpos de prova ao ensaio de ruptura por compressão axial, conforme a NBR-5739. Para cada composição, foram rompidos 2 corpos de prova por idade, aos 1, 3, 7 e 28 dias, a fim de calcular uma resistência média para cada composição a cada idade.

### 3.1.4 Definição das composições de argamassa cimentícia

A partir da determinação do traço de argamassa epoxídica que apresentou a resistência mais próxima de 35MPa, buscou-se a preparação de uma argamassa cimentícia com resistência mecânica equivalente. Com base em resultados contidos em relatórios do Laboratório de Tecnologia do Concreto da UHI, definiu-se uma argamassa padrão de traço TAC1 (1kg de cimento : 3kg de areia, fator água/cimento = 0,53) que apresentava uma resistência em torno de 30MPa. A consistência da argamassa padrão foi tomada como característica

de referência para a definição das composições de outras argamassas cimentícias que apresentariam adição de sílica e/ou aditivo superplastificante. A argamassa padrão (traço TAC1) apresentou 155mm como medida de sua consistência no ensaio da mesa de consistência manual, segundo a NBR-7215. As outras composições foram produzidas buscando-se uma consistência semelhante a do traço TAC1, variando-se a relação água/cimento para obter esta característica.

Além da argamassa padrão, foram produzidas 7 composições de argamassa cimentícia, conforme tabela II, sendo que foram utilizados cimento Portland CII 32F, areia do Rio Paraná com módulo de finura igual a 1,70, sílica, aditivos superplastificantes X, Y e Z e água.

Tabela II - Composições de argamassa cimentícia.

Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Sílica (kg)	Aditivo		Fator A/Ceq <sup>(6)</sup> (L/kg)
				Nome	(kg)	
TAC1	1,000	3,000	-	-	-	0,53
TAC2	0,920	3,000	0,080	-	-	0,53
TAC3	1,000	3,000	-	X	0,010	0,47
TAC4	0,920	3,000	0,080	X	0,010	0,46
TAC5	1,000	3,000	-	Y	0,010	0,50
TAC6	0,920	3,000	0,080	Y	0,010	0,50
TAC7	1,000	3,000	-	Z	0,010	0,40
TAC8	0,920	3,000	0,080	Z	0,010	0,45

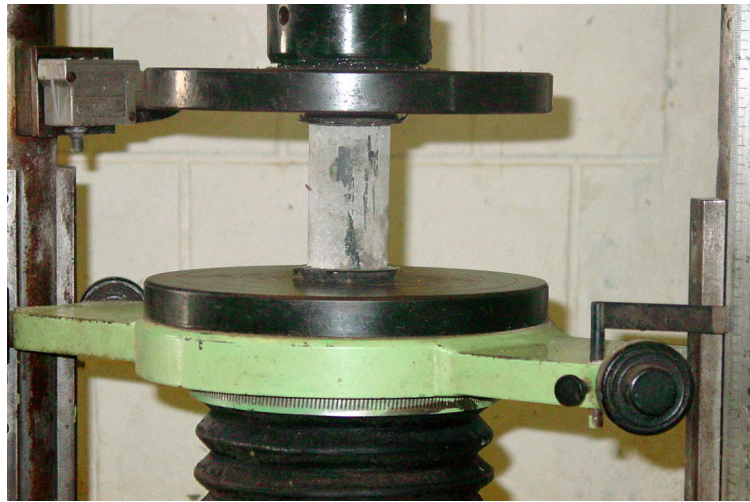
### 3.1.5 Preparação dos corpos de prova de argamassa cimentícia

Para cada composição de argamassa cimentícia definida, moldou-se 8 corpos de prova com dimensões de 5cm de diâmetro por 10cm de altura, segundo a norma NBR-5738, para a determinação da resistência mecânica aos 1, 3, 7 e 28 dias, totalizando 64 corpos de prova.

### 3.1.6 Determinação de propriedades dos corpos de prova de argamassa cimentícia

Confeccionados os corpos de prova de argamassa cimentícia, foi estimada a densidade das diferentes composições produzidas através da medida do volume e da massa de cada corpo de prova. Para a determinação da resistência mecânica, submeteu-se os corpos de prova ao ensaio de ruptura por compressão axial, conforme a NBR-5739 (fotografia II). Para cada composição, foram rompidos dois corpos de prova por idade, aos 1, 3, 7 e 28 dias, a fim de calcular uma resistência média para cada composição a cada idade.

(6) Fator água/cimento equivalente é a razão do volume de água em litros pela soma da massa de cimento e de sílica em quilogramas.



Fotografia II - Ensaio à ruptura por compressão axial.

### 3.1.7 Seleção das composições otimizadas de argamassas

Após investigadas as diferentes composições de argamassas, selecionou-se entre elas uma composição de argamassa epoxídica e uma de argamassa cimentícia que apresentaram resistência à ruptura por compressão axial semelhante a do concreto usado no vertedouro de Itaipu Binacional, ou seja, 35MPa.

### 3.2 Avaliação da deterioração das argamassas otimizadas

#### 3.2.1 Preparação dos corpos de prova das argamassas

Selecionadas as duas argamassas otimizadas (uma epoxídica e uma cimentícia), foram moldados 18 corpos de prova de cada composição, totalizando em 36 corpos de prova. Os corpos de prova de argamassa cimentícia foram deixados em cura em câmara úmida por um período de 30 dias e os corpos de prova de argamassa epoxídica permaneceram reservados pelo mesmo período.

#### 3.2.2 Ataque químico

Para avaliar a resistência das argamassas otimizadas ao ataque químico, corpos de prova foram imersos em soluções ácidas, como exemplificado na fotografia III. Os meios ácidos selecionados foram soluções de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e ácido nítrico ( $HNO_3$ ), ambas com concentração de 0,1 molar. Foram imersos, separadamente, 3 corpos de prova de cada argamassa em cada uma das soluções. Os corpos de prova permaneceram sob ataque por um período de 30 dias. A escolha das soluções utilizadas e do tempo de ataque foi feita conforme experiências realizadas por Delvecchi et al (2004).





Fotografia III - Corpo de prova de argamassa cimentícia imerso em solução de ácido nítrico.

### 3.2.3 Ataque microbiológico

#### A) Preparo das soluções concentradas de bactérias heterotróficas e fungos filamentosos

Primeiramente, foram coletados 20 litros de água do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional e realizada análise microbiológica da mesma. A partir da água coletada, isolou-se as bactérias heterotróficas em meio de cultura ACP (Agar Plate Count) para a quantificação e posteriormente estas foram qualificadas através da replicagem nos meios de cultura: manitol, Pseudomonas, MacConkey e Ágar Salmonella-Shigella. Os fungos filamentosos foram isolados em meio de cultura Sabouraud para quantificação e qualificação. Após a análise inicial da água coletada, realizou-se a concentração de bactérias heterotróficas e de fungos filamentosos presentes na amostra inicial em meio de cultura caldo BHI (Brain Heart Infusion Broth). Na preparação das soluções concentradas, misturou-se na proporção de 200ml de BHI concentrado de fungos/bactérias para 1 litro de água coletada do reservatório. Assim, obteve-se um total de 12 litros de solução concentrada de bactérias heterotróficas e 12 litros de solução concentrada de fungos filamentosos.

#### B) Imersão dos corpos de prova das argamassas otimizadas nas soluções concentradas

Com as soluções concentradas de microrganismos, preparadas para simular um ataque microbiológico de um longo período de ação, colocou-se sob imersão 3 corpos de prova de cada argamassa otimizada por um período de 60 dias nas soluções preparadas de bactérias heterotróficas e de fungos filamentosos, como pode ser observado na fotografia IV. Para possibilitar a verificação do grau de agressividade do ataque microbiológico das soluções concentradas, 3 corpos de prova de cada argamassa foram mergulhados em água deionizada estéril (ou branco) por um período de 60 dias para servirem de parâmetro de comparação.



Fotografia IV - Corpos de prova de argamassa epoxídica imersos em solução concentrada de fungos filamentosos.

### C) Análises quantitativa e qualitativa dos microrganismos

Periodicamente, ou seja, aos 0, 20, 40 e 60 dias, foi realizado o controle de bactérias heterotróficas e fungos filamentosos. Nas soluções concentradas de bactérias heterotróficas, para ambas as argamassas, foi realizada a quantificação pelo método Pour Plate em ACP e a qualificação através da replicagem nos meios de cultura: manitol, Pseudomonas, MacConkey e Ágar Salmonella-Shigella. Nas soluções concentradas de fungos filamentosos, para ambas as argamassas, foi realizada a quantificação e a qualificação pelo método Spread Plate em meio Sabouraud. Na água deionizada estéril, para ambas as argamassas, foi realizada a quantificação e a qualificação de bactérias heterotróficas e fungos filamentosos para comparativo com as análises realizadas nas soluções agressivas concentradas.

#### 3.2.4 Análise da perda de massa e dos produtos da lixiviação das argamassas

Para avaliar a perda de massa das argamassas selecionadas e determinar qual das argamassas sofreu menor deterioração química, os 12 corpos de prova submetidos aos meios ácidos foram pesados em balança de precisão de 0,1g antes e após o ataque químico. A investigação dos produtos de lixiviação das argamassas foi realizada pelo Laboratório de Tecnologia de Concreto da UHI através da análise química, segundo a NBR-5742, da água utilizada na composição das soluções ácidas e das soluções de ácido sulfúrico e ácido nítrico resultantes após 30 dias de ataque. Foram considerados produtos da lixiviação das argamassas, as substâncias encontradas nas soluções resultantes após o ataque químico que não foram observadas na água utilizada na composição das soluções.

Para avaliar a perda de massa das argamassas selecionadas e determinar qual das argamassas sofreu menor deterioração microbiológica, os 6 corpos de prova submetidos a solução de bactérias heterotróficas e os 6 corpos de prova submetidos a solução de fungos filamentosos foram pesados em balança de precisão de 0,1g antes e após o período de ataque.

### 3.2.5 Determinação da resistência mecânica dos corpos de prova atacados

Para avaliar a possível diminuição da resistência mecânica das argamassas após o período de ataque químico, procedeu-se o ensaio de ruptura por compressão axial, conforme a NBR-5739. Foram rompidos os 12 corpos de prova que ficaram imersos nas soluções ácidas e 3 corpos de prova de cada argamassa de igual idade que não foram submetidos ao ataque, para realizar-se a comparação dos valores de resistência destes e dos corpos de prova que foram atacados.

Para avaliar a possível diminuição da resistência mecânica das argamassas após o período de ataque microbiológico, procedeu-se o ensaio de ruptura por compressão axial, conforme a NBR-5739. Foram rompidos os 6 corpos de prova que ficaram imersos na solução de bactérias heterotróficas, os 6 corpos de prova que ficaram imersos na solução de fungos filamentosos e 3 corpos de prova de cada argamassa de igual idade que ficaram mergulhados em água deionizada estéril, para realizar-se a comparação dos valores de resistência destes e dos corpos de prova que foram atacados pelas soluções concentradas de microrganismos.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Otimização da composição de argamassa epoxídica

#### 4.1.1 Caracterização da resina e das composições de argamassa epoxídica

No processo de otimização da composição de argamassa epoxídica, mensurou-se o valor da viscosidade da mistura dos componentes (A e B) da resina epóxi, que foi igual a  $0,013 \text{ N.s/m}^2$ . Durante a reação exotérmica dos componentes da resina epóxi verificou-se a ocorrência de uma redução considerável na viscosidade devido o aumento da temperatura. Calculou-se também a densidade da resina epóxi e das diferentes composições de argamassa epoxídica preparadas com a mesma, conforme a tabela III.

Tabela III - Densidade da resina epóxi e das argamassas epoxídicas.

Composição	Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )
Resina epóxi	1088,77
TAE1	1735,00
TAE2	2034,00
TAE3	1783,44
TAE4	1719,30
TAE5	1687,80
TAE6	1730,00
TAE7	1776,70
TAE8	1812,73

A expectativa era que com o aumento de cimento ou areia nas respectivas argamassas ocorresse um aumento de densidade, pois a densidade da areia e do cimento é maior que a densidade da resina, entretanto, houve variações nos valores de densidade em quatro composições (TAE4, TAE5, TAE6 E TAE7). Essas variações ocorreram devido à falta de compactação da argamassa

dentro dos corpos de prova que fez com que aumentassem os espaços vazios dessas composições e assim diminuísse sua densidade.

#### 4.1.2 Determinação da resistência da resina e das argamassas epoxídicas

No gráfico I são apresentados os valores de resistência mecânica à ruptura por compressão axial dos corpos de prova da resina epóxi e das diferentes composições de argamassa epoxídica associados com as idades dos mesmos (aos 1, 3, 7 e 28 dias).

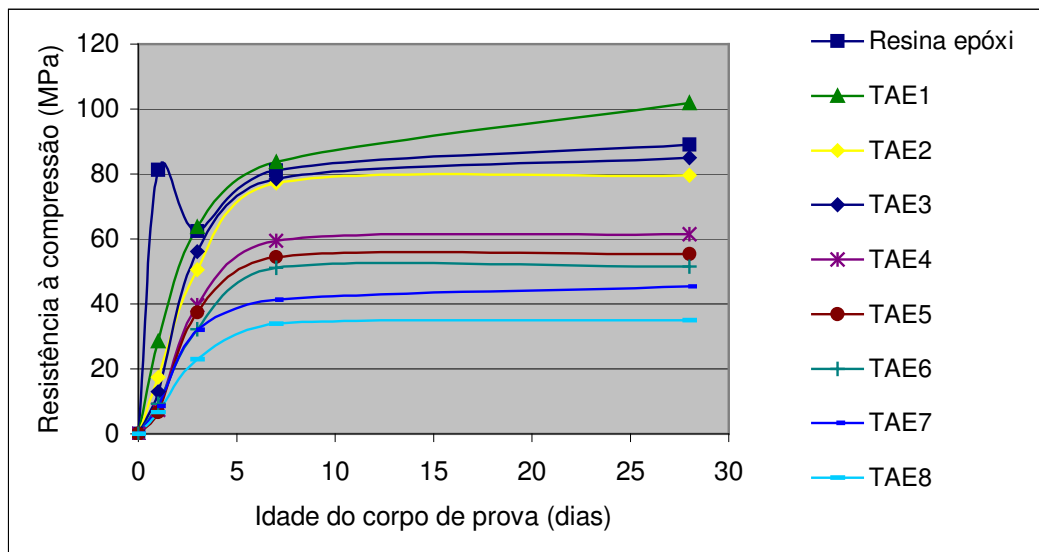


Gráfico I - Resistências da resina e das composições de argamassa epoxídica.

Pela análise do gráfico I, pode-se notar um comportamento ascendente da resistência mecânica à medida que se aumenta a idade dos corpos de prova, exceto para a resina epóxi pura, que no primeiro dia apresentou resistência maior que no terceiro dia. Isso se explica pela deformação excessiva no primeiro dia que elevou a área da secção transversal, contribuindo para o aumento da resistência à ruptura por compressão axial do corpo de prova. A partir do terceiro dia, a resina pura passa a apresentar o comportamento ascendente previsto. Com o aumento da quantidade de areia ou cimento e, conseqüentemente, com a diminuição da proporção de resina presente na argamassa epoxídica, a resistência dos corpos de prova diminuiu, diminuição esta que ocorre por ser a resina epóxi a responsável pela elevada resistência à ruptura por compressão axial da argamassa. A composição de argamassa epoxídica de 1kg resina : 6kg de areia (TAE7) foi selecionada como ótima, em termos deste trabalho, para reparos em superfícies hidráulicas em concreto de resistência de 35MPa, considerando que esta composição apresentou resistência 45,31MPa aos 28 dias, maior que 35MPa, e um custo menor em comparação com as outras composições cuja proporção de resina epóxi é maior.

## 4.2 Otimização da composição de argamassa cimentícia

### 4.2.1 Caracterização das composições de argamassa cimentícia

No processo de otimização da composição de argamassa cimentícia, mensurou-se o valor da consistência e calculou-se a densidade das diferentes composições de argamassa cimentícia preparadas, conforme valores apresentados na tabela IV.

Tabela IV - Consistência e densidade das argamassas cimentícias.

Composição	Consistência (mm)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
TAC1	155	1858,30
TAC2	128	1896,67
TAC3	164	1955,08
TAC4	149	1989,78
TAC5	175	1989,67
TAC6	143	1997,50
TAC7	138	2066,89
TAC8	140	2072,32

Na tabela IV é visível que os traços (TAC2, TAC3, TAC4, TAC5, TAC6, TAC7 e TAC8) apresentaram uma consistência semelhante à fixada pelo traço TAC1. Os traços com adição de sílica apresentaram uma densidade maior, devido à sílica ocupar os espaços vazios.

### 4.2.2 Determinação da resistência das argamassas cimentícias

No gráfico II são apresentados os valores de resistência mecânica à ruptura por compressão axial dos corpos de prova das diferentes composições de argamassa cimentícia associadas com as idades dos mesmos (aos 1, 3, 7 e 28 dias).

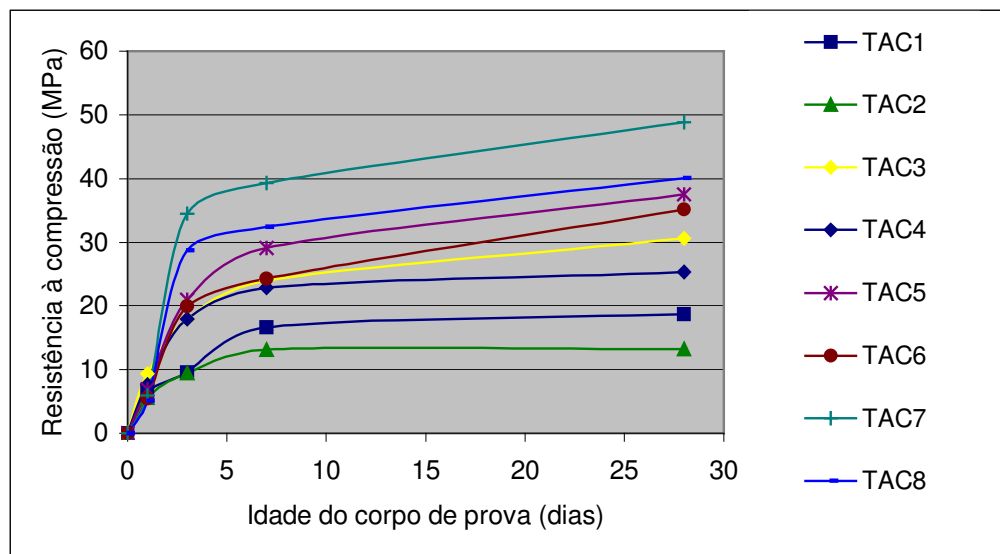


Gráfico II - Resistências das composições de argamassa cimentícia.

Pela análise do gráfico II, pode-se notar um comportamento ascendente da resistência mecânica à medida que se aumenta a idade dos corpos de prova. Observa-se que as composições produzidas com 100% de cimento como aglomerante apresentaram resistência mecânica maior que aquelas que tiveram uma proporção de sílica em substituição ao cimento (TAC1 > TAC2, TAC3 > TAC4, TAC5 > TAC6 e TAC7 > TAC8). Teoricamente, sabe-se que a sílica, que apresenta granulometria menor que a do cimento, aumenta a homogeneidade da argamassa e promove um melhor travamento mecânico dos componentes da mesma, contribuindo com o aumento da resistência mecânica. Porém, nos ensaios de ruptura por compressão axial realizados, observou-se um comportamento diferente do previsto. Entre os 3 diferentes tipos de aditivos superplastificantes utilizados, o superplastificante Z foi o mais eficiente, tornando o traço TAC7 (1kg de cimento : 3kg de areia : 10g de superplastificante Z) o de resistência mais próxima do traço de argamassa epoxídica selecionado. A resistência aos 28 dias foi de 48,86MPa, maior que a resistência requerida para argamassas de reparo em superfícies hidráulicas em concreto de resistência de 35MPa.

#### 4.3 Comparativo entre as argamassas selecionadas

Realizada a seleção de uma composição de argamassa epoxídica (TAE7 - 1kg resina : 6kg de areia) e uma de cimentícia (TAC7 - 1kg de cimento : 3kg de areia : 10g de superplastificante Z), considerando a resistência mecânica maior que a requerida para argamassa de reparo em concreto de 35MPa, no gráfico III é apresentada a resistência à ruptura por compressão axial dos corpos de prova das argamassas otimizadas aos 1, 3, 7 e 28 dias.

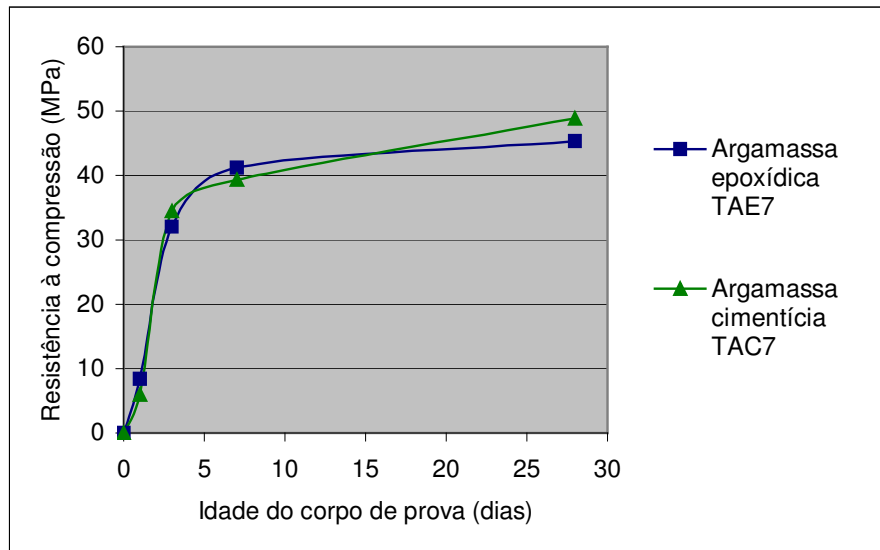


Gráfico III - Resistências das argamassas selecionadas.

Pelo gráfico III, é possível observar que ambas as argamassas apresentaram uma resistência alta aos 3 dias (cerca de 70% da resistência aos 28 dias), importante quando se necessita uma resistência mais elevada logo no início do reparo.

#### 4.4 Análise microbiológica da água coletada do Reservatório da UHI

A análise microbiológica da água coletada do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional apresentou os seguintes resultados:

- Bactérias heterotróficas: concentração média igual a  $4,26 \times 10^3$  UFC/mL<sup>(7)</sup>.  
Microrganismos presentes: *Enterobacter* sp., *Escherichia coli*, *Staphylococcus* sp. e *Klebsiella* sp.
- Fungos filamentosos: concentração média igual a  $5,07 \times 10^2$  UFC/mL.  
Microrganismos presentes: Leveduras, *Mucor* sp. e *Rhodotorula* sp.

#### 4.5 Análises quantitativa e qualitativa dos microrganismos

Aos 0, 20, 40 e 60 dias, foi realizado o controle de bactérias heterotróficas e fungos filamentosos nas respectivas soluções concentradas e na água estéril para ambas às argamassas. Aos 60 dias foram verificados os microrganismos conforme apresentados na tabela V.

Tabela V - Qualificação microbiológica aos 60 dias de ataque.

Soluções	Microrganismos presentes	
	Argamassa cimentícia	Argamassa epoxídica
Solução concentrada de bactérias heterotróficas	<i>Enterobacter</i> sp. <i>Staphylococcus</i> sp. <i>Proteus mirabilis</i> <i>Bacillus</i> sp.	<i>Enterobacter</i> sp. <i>Staphylococcus</i> sp. <i>Proteus vulgaris</i> <i>Salmonella</i> sp. <i>Bacillus</i> sp.
Solução concentrada de fungos filamentosos	Leveduras <i>Candida</i> sp. <i>Mucor</i> sp.	Leveduras
Água deionizada estéril	Leveduras <i>Mucor</i> sp. <i>Aspergillus niger</i>	<i>Enterobacter</i> sp. <i>Proteus mirabilis</i> <i>Rhodotorula</i> sp.

No gráfico IV é apresentada a quantificação dos microrganismos realizada periodicamente, aos 0, 20, 40 e 60 dias de ataque microbiológico para ambas as argamassas. Nas soluções concentradas de bactérias heterotróficas foi feito somente o controle destas, assim como nas soluções concentradas de fungos filamentosos, foi feito somente o controle de fungos filamentosos. Já para a água deionizada estéril, foi feito controle de bactérias heterotróficas e de fungos filamentosos, para ambas as argamassas.

Pelo gráfico IV é possível observar um comportamento irregular da proliferação de bactérias heterotróficas e de fungos filamentosos nas soluções concentradas e na água estéril para ambas as argamassas.

---

(7) Unidade Formadora de Colônia por mililitro.

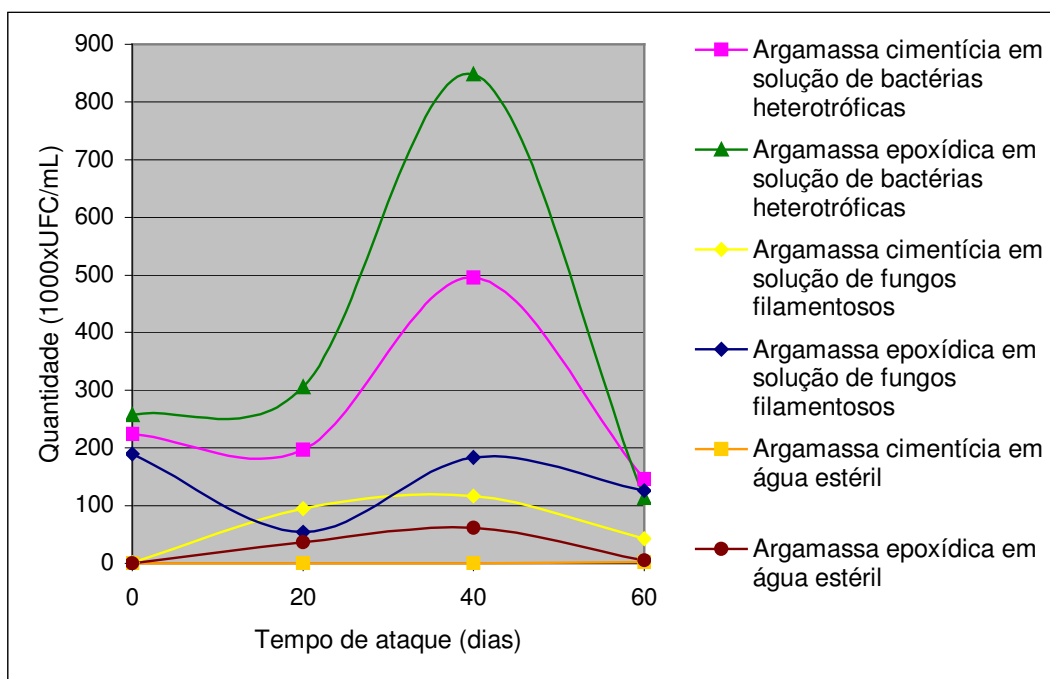


Gráfico IV - Quantificação microbiológica.

#### 4.6 Análise da perda de massa e dos produtos da lixiviação

Na tabela VI, são apresentados os valores percentuais da perda de massa dos corpos de prova das argamassas selecionadas após um período de 30 dias de ataque em soluções de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e ácido nítrico ( $HNO_3$ ).

Tabela VI - Perda de massas das argamassas sob ataque químico.

Argamassa	Perda de massa (%)	
	Solução de $H_2SO_4$	Solução de $HNO_3$
Cimentícia (TAC7)	0,200%	0,450%
Epoxídica (TAE7)	0,053%	0,160%

Pela análise dos dados da tabela VI, observa-se que a solução de  $HNO_3$  foi o meio mais agressivo para ambas as argamassas. Para as duas soluções ácidas, a argamassa epoxídica mostrou-se mais resistente ao ataque. Como resultado parcial da análise dos produtos da lixiviação das argamassas, verificou-se, para a argamassa cimentícia, a presença de uma quantidade considerável de cálcio na solução resultante do meio de ataque de  $HNO_3$ .

Na tabela VII, são apresentados os valores percentuais da perda de massa dos corpos de prova das argamassas selecionadas após um período de 60 dias de ataque em soluções concentradas de bactérias heterotróficas e de fungos filamentosos.



Tabela VII - Perda de massas das argamassas sob ataque microbiológico.

Argamassa	Perda de massa (%)	
	Solução concentrada de bactérias heterotróficas	Solução concentrada de fungos filamentosos
Cimentícia (TAC7)	0,1005%	0,1065%
Epoxídica (TAE7)	0,0465%	0,0260 %

Pela análise dos dados da tabela VII, verificou-se que a argamassa epoxídica mostrou-se mais resistente ao ataque que a argamassa cimentícia para as duas soluções concentradas.

#### 4.7 Determinação da resistência mecânica dos corpos de prova atacados

Na tabela VIII, são apresentados os valores de resistência mecânica dos corpos de prova das argamassas selecionadas aos 60 dias de idade, dos quais 30 dias são de ataque químico em soluções de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e ácido nítrico ( $HNO_3$ ). Consta também na tabela VIII a resistência mecânica aos 60 dias dos corpos de prova das argamassas não submetidos ao ataque químico.

Tabela VIII - Resistência dos corpos de prova sob ataque químico.

Argamassa	Resistência mecânica dos corpos de prova (MPa)		
	Sem ataque	Solução de $H_2SO_4$	Solução de $HNO_3$
Cimentícia (TAC7)	55,83	45,86	49,50
Epoxídica (TAE7)	53,00	47,83	53,00

Pela análise dos dados da tabela VIII, observa-se que a solução de  $H_2SO_4$  foi o meio mais agressivo para ambas as argamassas. Nesta solução, a argamassa cimentícia apresentou uma perda considerável de resistência mecânica, cerca de 18%, quando comparada à perda de resistência da argamassa epoxídica, em torno de 10%. Para ambas as soluções ácidas, a argamassa epoxídica mostrou-se mais resistente ao ataque, inclusive não sofrendo redução alguma de resistência quando submetida à solução de  $HNO_3$ .

Na tabela IX, são apresentados os valores de resistência mecânica dos corpos de prova das argamassas selecionadas aos 90 dias de idade, dos quais 60 dias são de ataque microbiológico em soluções concentradas de bactérias heterotróficas, de fungos filamentosos e água deionizada estéril.

Tabela IX - Resistência dos corpos de prova sob ataque microbiológico.

Argamassa	Resistência mecânica dos corpos de prova (MPa)		
	Água deionizada estéril	Solução concentrada de bactérias heterotróficas	Solução concentrada de fungos filamentosos
Cimentícia (TAC7)	56,96	55,86	56,22
Epoxídica (TAE7)	45,33	44,87	43,79

Pela análise dos dados da tabela IX, observou-se que os corpos de prova das argamassas otimizadas quando atacados pelas soluções concentradas apresentaram uma diminuição de resistência pequena, em torno de 1%, exceto a argamassa epoxídica em solução concentrada de fungos filamentosos que apresentou diminuição de resistência de aproximadamente 3,4%.

## 5 CONCLUSÕES

- A composição de argamassa epoxídica de 1kg resina : 6kg de areia (TAE7) foi selecionada como apropriada para reparos em superfícies hidráulicas em concreto de resistência de 35MPa, considerando que esta composição apresentou resistência 45,31MPa aos 28 dias.
- A composição de argamassa cimentícia de 1kg de cimento : 3kg de areia : 10g de superplastificante Z, fator água/cimento = 0,40 (TAC7) foi selecionada como apropriada para reparos em superfícies hidráulicas em concreto de resistência de 35MPa, considerando que esta composição apresentou resistência 48,86MPa aos 28 dias.
- Ambas as argamassas selecionadas apresentaram uma resistência mecânica alta aos 3 dias (cerca de 70% da resistência aos 28 dias), importante quando se necessita uma resistência mais elevada logo no início do reparo. Porém, na aplicação de argamassas reparadoras, deve-se considerar a diferença do custo das mesmas e a extensão do reparo a ser realizado.
- A solução de ácido nítrico foi o meio que promoveu maior perda de massa para ambas as argamassas. Entretanto, esta perda de massa não afetou a resistência mecânica da argamassa epoxídica. Com relação à perda de resistência mecânica, a solução de ácido sulfúrico foi o meio mais agressivo.
- Para ambas as soluções ácidas, a argamassa epoxídica mostrou-se mais resistente ao ataque químico que a argamassa cimentícia, considerando a perda de massa e a diminuição da resistência mecânica.
- Para as soluções concentradas de bactérias heterotróficas e de fungos filamentosos, a argamassa epoxídica mostrou-se mais resistente ao ataque microbiológico que a argamassa cimentícia, considerando a perda de massa.
- Para ambas as soluções concentradas, verificou-se que os corpos de prova das argamassas otimizadas apresentaram uma pequena diminuição de resistência mecânica, exceto a argamassa epoxídica em solução concentrada de fungos filamentosos.

## 6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório Ambiental e Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu Binacional pelo auxílio técnico e ao PDTA - PTI (Programa de Desenvolvimento de Tecnologia Avançado - Parque Tecnológico de Itaipu) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

VILLALBA, P. E.; PORTELLA, K. F.; BRAGA, J. A.; SALLES, A. Revista IBRACON. Ano X, 2002, jul./set., 53-66.

KORMANN, A. C. M.; PEREIRA, P. N.; PORTELLA, K. F.; NOGUEIRA, J. R. G.; SANTOS, R. P. dos. Metodologias de reparos em estruturas hidráulicas de barragens: parte 1, estudos preliminares. In: 43<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Concreto. IBRACON, Foz do Iguaçu, 2003.

SANTOS L. C. dos; FERNANDES, R. D.; FRANÇA, F. P.; STECANELLA, M. B.; MORA, N. D. Avaliação bacteriológica de drenos de rocha – um fator de risco para a segurança de grandes barragens. In: 9ª Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos. ABENDE, Salvador, 2007.

KORMANN, A. C. M.; PORTELLA, K. F.; PEREIRA, P. N.; SANTOS, R. P. dos. Processos erosivos em superfícies de concreto de barragens: mecanismos de recuperação. In: XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens. CBDB, Fortaleza, 2001.

ABREU, A. de; LUCAS, J. F. R.; FABRO, G.; MORA, N. D. Influência da composição na resistência mecânica da argamassa epoxídica. In: XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. Unijuí, Ijuí, 2006.

SHIRAKAWA, M. A.; CINCATTO, M. A.; RZYSKI, B. M. Revista IBRACON. Ano V, 1997, jul./ago., 16-22.

SHIRAKAWA, M. A.; JOHN, V.; CINCATTO, M. A.; HELENE, P.; PALERMO, G.; GAMBALE, W. Biodeterioração do concreto de estruturas subterrâneas. In: III Seminário Internacional Durabilidade de Materiais, Componentes e Estruturas. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1997.

LEONARDO, C. R T.; PORTELLA, K. F.; POSSAN, E.; SALES, A I. Revista IBRACON. Ano X, 2002, out./dez., 72-78.

KORMANN, A. C. M. Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Setor da Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

DELVECCHI, E. D. C.; SANTOS, L. C.; DÍAZ MORA, N. Estudo comparativo do grau de agressividade de um meio bacteriológico versus meio químico e eletroquímico em amostras metálicas e amostras de concreto. In: 24º Congresso Brasileiro de Corrosão. ABRACO, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. ABNT, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5739: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. ABNT, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7215: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. ABNT, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5742: Análise química de cimento Portland: processos de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. ABNT, Rio de Janeiro, 1977.