

AValiação DE SISTEMAS DE REPARO DE SUPERFÍCIES DE CONCRETO ÚMIDAS DE UHE'S SUBMETIDAS À EROSIÃO POR ABRASÃO HIDRÁULICA

José Rodrigo Santana PINHO

Eng° Civil M.Sc. – Universidade Federal do Pará / Companhia Docas do Pará.

Luis Antônio Guimarães BITTENCOURT JR.

Eng° Civil – Universidade Federal do Pará.

Márcio Santos BARATA

Eng° Civil, M.Sc, Prof. – Faculdade Ideal (FACI).

Remo Magalhães de SOUZA

Eng° Civil, M.Sc., Ph.D., Prof. – Universidade Federal do Pará (UFPA).

RESUMO

Um dos problemas mais usuais em estruturas de concreto de usinas hidroelétricas refere-se ao fenômeno de erosão por abrasão ou cavitação que geralmente ocorre nos vertedouros e/ou sistema de adução das casas de força. Os danos causados por estes fenômenos podem assumir proporções muito elevadas, comprometendo a segurança das estruturas de concreto das usinas, e podendo até mesmo levá-las a ruína parcial ou total, como nos casos das barragens de Glen Canyon nos EUA e de Tarbela no Paquistão. Este artigo apresenta uma avaliação de diversos materiais de reparo em estruturas de concreto frente à abrasão hidráulica, considerando também a aderência entre o reparo e o substrato. Os resultados demonstram que os compostos de base cimentícia constituem uma boa solução para os reparos.

ABSTRACT

One of the most usual problems in concrete structures of hydroelectric power plants is the phenomenon of erosion by abrasion or cavitation, which generally occurs on the spillways and/or on the water intake system of the power house. The damages caused by these phenomena can be very severe, putting the safety of concrete structures at risk, and even leading them to complete or partial failure, as it has occurred with Glen Canyon Dam in the USA and Tarbela Dam in Pakistan. This paper presents an evaluation of several repair materials in concrete structures subjected to hydraulic abrasion, considering also the adherence between the repair material and the substrate. The results demonstrate that cementitious materials are a good solution for the repairs.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto de uma usina hidroelétrica devem ser projetadas e executadas para desempenhar suas funções pelo período de tempo previsto na elaboração do empreendimento, e devendo suportar ao longo da sua vida útil as mais diversas solicitações, tanto mecânicas quanto do ambiente na qual estão inseridas.

Até há pouco tempo, o meio técnico científico creditava ao material concreto utilizado em barragens uma durabilidade bastante prolongada, mas sabe-se hoje em dia que isto não corresponde à realidade. Nos últimos anos, exemplos de degradação prematura das estruturas de concreto em barragens tornaram-se cada vez mais freqüentes, sob diversas formas de deterioração.

Um dos problemas mais usuais em estruturas de concreto de usinas hidroelétricas refere-se ao fenômeno de erosão que geralmente ocorre nos vertedouros e sistema de adução das casas de força. A erosão no concreto consiste em um desgaste da superfície do material pela ação da água, e ocorre principalmente devido a duas causas: abrasão e cavitação. A abrasão consiste no desgaste da superfície de concreto pelos sólidos suspensos na água (areia ou silte). O fenômeno de cavitação consiste na formação de bolhas de vapor em regiões onde a pressão cai abaixo da pressão de vapor da água, com seguida explosão destas bolhas em regiões de alta pressão; a explosão das bolhas cria ondas de choque no líquido, provocando impingimento na superfície de concreto, e podendo causar um elevado nível de deterioração.

Vários problemas causados por abrasão e cavitação em inúmeras barragens em vários países são conhecidos no meio técnico. Dois eventos de grande destaque internacional com barragens, abrangendo alto nível de destruição das estruturas de concreto causado pelo fenômeno de cavitação são, por exemplo, os casos da barragem de Tarbela no Paquistão, onde um dos túneis da barragem chegou ao colapso, e da barragem de Glen Canyon nos EUA, onde a cobertura de concreto de aproximadamente 1 m de espessura, para proteção dos túneis do vertedor foi completamente destruída por cavitação. Outras barragens que apresentaram relevantes problemas de erosão por cavitação são, por exemplo: Kinzua Dam, Dworshak Dam e Libby Dam nos EUA; MacKay Dam e Hugh Keenleyside Dam no Canadá; Karun no Irã; Guri na Venezuela; Itaipu e Ilha Solteira, entre outras, no Brasil;

A FIGURA 1 ilustra a situação da superfície da bacia de decantação da UHE de Dworshak, após a ocorrência de erosão por abrasão hidráulica, onde foram observadas cavidades com profundidades maiores que 1,0m.

O elevado nível dos prejuízos causados por deteriorações de estruturas de concreto nas usinas hidroelétricas tem motivado a realização de inúmeras pesquisas sobre o problema, por iniciativa de diversas empresas do setor Elétrico no Brasil e de outros países, na busca de soluções apropriadas.



FIGURA 1: Situação da bacia de decantação da usina hidrelétrica Dworshak após a erosão por abrasão hidráulica.

Além dos custos diretos com o reparo das estruturas de concreto propriamente dito e, possivelmente de equipamentos mecânicos danificados por falhas nas estruturas de concreto, existem outros custos indiretos. Como exemplo, citam-se os custos relacionados à interrupção de geração, ocasionando perda de faturamento, e outros mais difíceis de serem mensurados, tais como os prejuízos referentes a imagem da empresa concessionária ocasionados por falhas no sistema.

Cabe destacar que inúmeras pesquisas têm sido realizadas sobre deterioração em superfícies hidráulicas abertas de concreto, como por exemplo vertedouros e canais. Entretanto, ainda são poucos os estudos sobre a execução de serviços de reparo nas superfícies das estruturas submersas da casa de força, nas quais as condições climáticas são totalmente diferentes. A elevada umidade dificulta em muito a execução de um serviço de reparo que seja eficiente. Apesar do reduzido número de trabalhos realizados neste sentido, ainda sim, falhas nas unidades geradoras de energia podem, de forma ainda mais acentuada que nos vertedouros, comprometer as condições de operação da usina.

Nesse contexto, a UHE de Curuá-Una, situada no noroeste do estado do Pará, apresenta sintomas patológicos no concreto da estrutura da casa de força. Mais precisamente, foi observado nos últimos anos erosão deste material. Visto que parte da energia da cidade de Santarém, principalmente provém desta usina, um estudo com vistas a aumentar a vida útil desse concreto foi conduzido pela Universidade Federal do Pará (UFPA), em parceria com a REDE CELPA, concessionária de energia do estado do Pará, através de um projeto P&D intitulado: “Desenvolvimento de Novas Tecnologias de Reparo para o Problema de Cavitação e Abrasão no Concreto em Usinas Hidrelétricas” [1]. Embora na época da realização da pesquisa, a Rede Celpa fosse proprietária da UHE Curuá-Una, atualmente a proprietária da usina é a Eletronorte – Centrais Elétricas do Norte do Brasil, S.A.

Deve-se destacar também que embora esta pesquisa tenha sido realizada tendo a UHE Curuá-Una como objeto principal de estudo, a metodologia utilizada e os resultados obtidos se aplicam a UHE's em geral, sejam elas de pequeno, médio ou grande porte. A FIGURA 2 apresenta um dos locais onde ocorreram os danos na

UHE de Curuá-Una. A localização das patologias é variada, podendo ocorrer tanto nas estruturas das casas de força (Tomada d'água, caixa espiral e tubo de sucção), como no vertedouro.



(a) Patologia encontrada na parede de concreto do tubo de sucção da UHE de Curuá-Una; (b) Situação da superfície após a retirada do material segregado.

A solução deste tipo de problema é bastante complicada em razão de não se dispor de um prazo adequado para efetivação dos serviços de reparo, como também da complexidade relacionada com a umidade elevada do ambiente, o que dificulta e restringe o rol de materiais freqüentemente empregados na efetivação de serviços de reparo.

Associado a este fato, a crescente demanda por energia faz com que os prazos referentes a parada para manutenção preventiva das unidades geradoras das usinas hidrelétricas sejam bastante reduzidos, o que torna imprescindível a avaliação de desempenho de novos materiais ou novas combinações de materiais nas condições citadas acima, com vistas a permitir a liberação das estruturas de concreto reparadas em pelo menos 03 ou 07 dias após o reparo, tendo em vista todos os aspectos envolvidos com este tipo de obra e sua importância para a sociedade.

2. MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram, basicamente, cimentos CP I-32 S (para confecção dos cp's de 300x50mm do substrato usados no teste de abrasão) e CP V-ARI (usados nas argamassas de reparo cimentícias, nas pastas adesivas de cimento e nos cp's cilíndricos de 100x200mm dos ensaios de ponte de aderência), seixo fino (equivalente à graduação "0"), brita calcárea de graduação "1", areia fina comum na região e aditivo hiperplastificante com base de policarboxilatos. Além destes materiais, outros produtos ditos como industrializados foram utilizados nos testes de ponte de aderência. Foram eles: um adesivo epóxi indicado para aplicação em substratos secos; um *primer* epóxi indicado para aplicação em substratos úmidos e uma resina acrílica indicada para superfícies úmidas.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 ENSAIO DE PONTE DE ADERÊNCIA (SLANT SHEAR TEST)

Para a realização do ensaio de ponte de aderência, utilizou-se cp's cilíndricos de concreto de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Este concreto foi dosado para obter resistência de cerca de 50 MPa aos 3 dias de idade, resistência considerada satisfatória para o nível de tensão proposto. Os espécimes eram então imersos em um tanque com água para a correta cura, cortados em um ângulo de 60° com a horizontal (corpo-de-prova em pé), tinham a sua superfície diagonal apicoada com ponteira e/ou talhadeira e depois retornavam para o tanque, onde permaneciam até momentos antes do ensaio. Ao retirá-los da água, procedeu-se a limpeza manual dos mesmos com água e escova de aço, a fim de retirar detritos e sujeiras provenientes do tanque de imersão. Antes da aplicação dos adesivos, os cp's eram encharcados em uma bacia com água limpa, para simular as condições de aplicação do local. Os adesivos eram aplicados segundo as recomendações dos fabricantes (com uma espessura de 1,0 a 2,0 mm, quando espatulados) e em seguida eram preenchidos com um concreto similar ao concreto do substrato. A cura desses corpos-de-prova foi realizada em câmara úmida.

Os espécimes cortados eram ensaiados à compressão axial e a sua resistência foi comparada com a obtida pelos cp's íntegros, moldados para a devida comparação e posterior avaliação da eficiência.

Um resumo do programa experimental, com o número de cp's utilizados neste ensaio encontra-se na TABELA 1.

CONCRETO DO SUBSTRATO	MATERIAIS CONSTITUINTES DAS PONTES DE ADERÊNCIA	QUANTIDADE DE CP'S POR IDADE	IDADES (DIAS)	SUBTOTAL DE CP'S CORTADOS	SUBTOTAL DE CP'S DE REFERÊNCIA
Resistência à compressão axial igual a 50 MPa	Pasta cimentícia 0% de adição de pozolana.	3	3 e 28	6	6
	Adesivo epóxi para superfície seca.	3	3 e 28	6	
	Primer epóxi para superfície úmida.	3	3 e 28	6	
	Resina acrílica para superfície úmida	3	3 e 28	6	
SUBTOTAL DE CP'S (10x20) =				24	12
TOTAL DE CP'S (10x20) =				36	

TABELA 1: Pontes de aderência dos diversos sistemas de reparo e materiais constituintes

3.2 ENSAIO DE ABRASÃO

O ensaio de abrasão de espécimes de concreto foi realizado de acordo com os procedimentos do ensaio CRD-80 [2], realizado pela equipe técnica do laboratório de concreto de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS, cujo procedimento é baseado no ensaio padronizado pela norma americana ASTM C1138 – *Underwater method* [3]. No ensaio realizado, foram moldadas “bolachas” de concreto com 300 mm de diâmetro e 50 mm de altura para a confecção dos concretos do substrato (executados com cimento CP I-32 S) e para as argamassas de reparo, com apenas 30 mm de altura, sendo que os outros 20 mm seriam completados com o material de reparo e uma pasta cimentícia (1 parte de cimento + sílica ativa para 0,20 partes de água) para promoção da devida aderência entre os materiais (FIGURA 3). Esta pasta era aplicada com o substrato apicoado com ponteira e/ou talhadeira e saturado, todavia com a superfície seca.

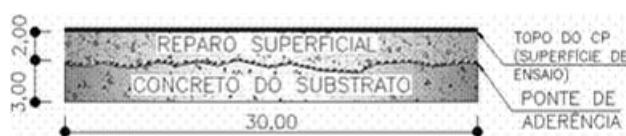


FIGURA 3: Esquema de aplicação de argamassas de reparo para ensaio de abrasão (medidas em cm).

Após preparados, os corpos-de-prova eram postos na câmara úmida até momentos antes do ensaio. O mecanismo de desgaste era promovido pela ação de esferas de aço depositadas sobre a superfície dos cp's (topo) através da rotação da água na qual o conjunto estava inserido (que por sua vez estava contida em um recipiente metálico de 300 mm de diâmetro, aproximadamente). O peso de cada cp era medido antes do início dos ensaios, às 24, 48 e 72 horas de ensaio, para a verificação do desgaste em percentual relativo ao peso original.

Os materiais utilizados se encontram descritos na TABELA 2. Foi confeccionado um par de corpos-de-prova para cada material.

TIPO DE REPARO	MATERIAIS	ADIÇÃO OU REVESTIMENTO
Reparo Superficial (cavidades com profundidades menores ou iguais a 20 mm)	Argamassa cimentícia.	Sem adição de pozolana (0%) – (1:2,02:0,29:0,90%)
		Com adição de metacaulim (10% em massa de cimento) (1:2,24:0,40:1,58%)
	Com adição de sílica ativa (10% em massa de cimento) (1:2,09:0,25:0,89%)	
Concreto do substrato (referência), com resistência característica em torno de 20 MPa.		Sem revestimento ou adição (Cimento:areia:seixo:água/cimento - 1:1,81:3,34:0,65)

TABELA 2: Resumo dos materiais utilizados no ensaio de abrasão hidráulica. Traço em peso: (aglomerante:areia:relação água/aglomerante:aditivo hiperplastificante em percentagem de cimento)

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 ENSAIO DE PONTE DE ADERÊNCIA

A dificuldade para elaboração e utilização de materiais que preencham os requisitos de aderência e consistência, para a execução em uma UHE, vem da necessidade de certas características para aplicação, pois o substrato se encontra bastante úmido e pode ser necessária a realização de aplicações inclusive em tetos. Portanto, o estudo da aderência e dos materiais que a promovem é tão importante para o reparo quanto a sua própria resistência à abrasão, principal ação mecânica de desgaste atuante no revestimento do tubo de sucção da referida UHE.

A TABELA 3 a seguir fornece a média dos valores de resistências à compressão axial obtidos para cada adesivo, para as idades de 3 e 28 dias.

ADESIVOS TESTADOS	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			
	Aos 3 dias de idade		Aos 28 dias de idade	
	Pontes de aderência	Referência	Pontes de aderência	Referência
Pasta cimentícia 0% de adição de pozolana. (a/c = 0,20)	37,52	45,55	42,50	47,90
Adesivo epóxi para superfície seca.	21,80		25,82	
Primer epóxi para superfície úmida.	12,64		19,95	
Resina acrílica para superfície úmida	17,59		17,88	

TABELA 3: Resistências médias dos espécimes às idades de 3 e 28 dias.

A evolução das médias das resistências à compressão axial dos espécimes cortados encontra-se na FIGURA 4, onde nota-se que, na média, todos os exemplares, à exceção dos compostos com resina acrílica para superfícies úmidas, obtiveram aumento de resistência à compressão com o aumento da idade de 3 aos 28 dias. Observa-se, também, que a resistência média já aos 3 dias de idade dos cp's da pasta cimentícia foi superior às resistências aos 28 dias dos exemplares dos materiais industrializados. Restringindo a comparação apenas entre estes materiais industrializados, ocorre algo similar com o epóxi para superfícies secas quando comparado aos dois restantes.

A ruptura dos espécimes ocorreu sempre na junta de adesão, o que caracteriza que nenhuma das pontes de aderência utilizadas promoveu resistência de adesão igual ou superior à resistência dos concretos que elas uniam. A FIGURA 5 apresenta os cp's rompidos com 3 dias de idade, evidenciando a ruptura na junta diagonal. Analisando a forma de ruptura dos exemplares, percebeu-se que o descolamento (ruptura) ocorria sempre entre a pasta adesiva e o concreto velho, ou substrato, que se encontrava apicoado e encharcado. Esta condição foi bastante significativa no desempenho dos adesivos epóxi e acrílico, afetando-o negativamente.

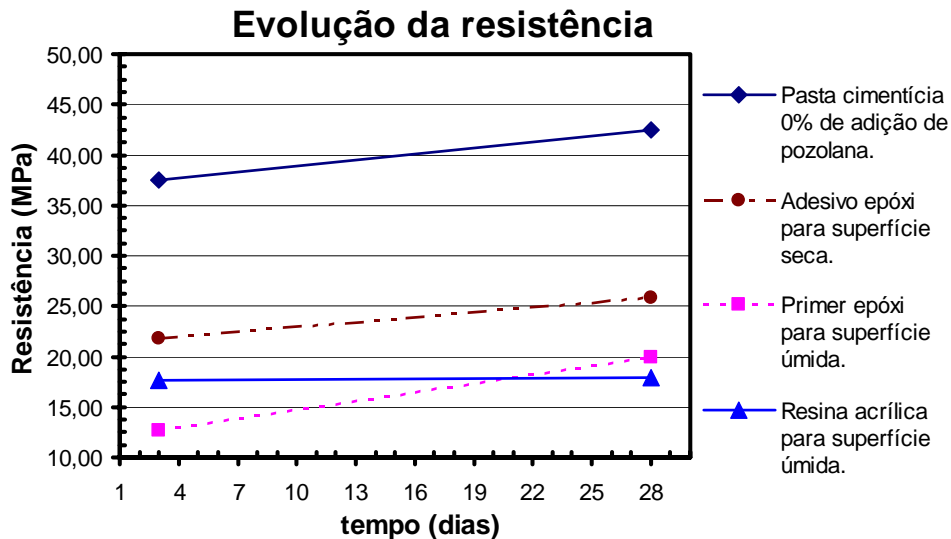


FIGURA 4: Evolução da resistência média em função do tempo, para os cp's colados.



FIGURA 5: Espécimes adesivos industrializados, rompidos aos 3 dias, demonstrando ruptura na junta, especialmente entre o concreto do substrato e o adesivo.

A FIGURA 6 compara as resistências médias obtidas pelos corpos-de-prova colados através das pontes de aderência com a resistência média do concreto de referência, para as idades de 3 e 28 dias. Nota-se, primeiramente, que nenhum dos materiais obteve resistência igual aos cp's íntegros, de referência. Vale ressaltar que a resistência aos 28 dias de idade destes apresentou pequeno aumento de resistência, sendo que aos 3 dias de idade a resistência era aproximadamente 95% desta referida grandeza aos 28 dias. Desempenho análogo foi observado na pasta cimentícia, onde a resistência aos 3 dias foi cerca de 88% do valor aos 28 dias. Este comportamento pode ser explicado pelo uso do cimento de alta resistência inicial CP V - ARI e pela baixa relação água/cimento desses materiais.

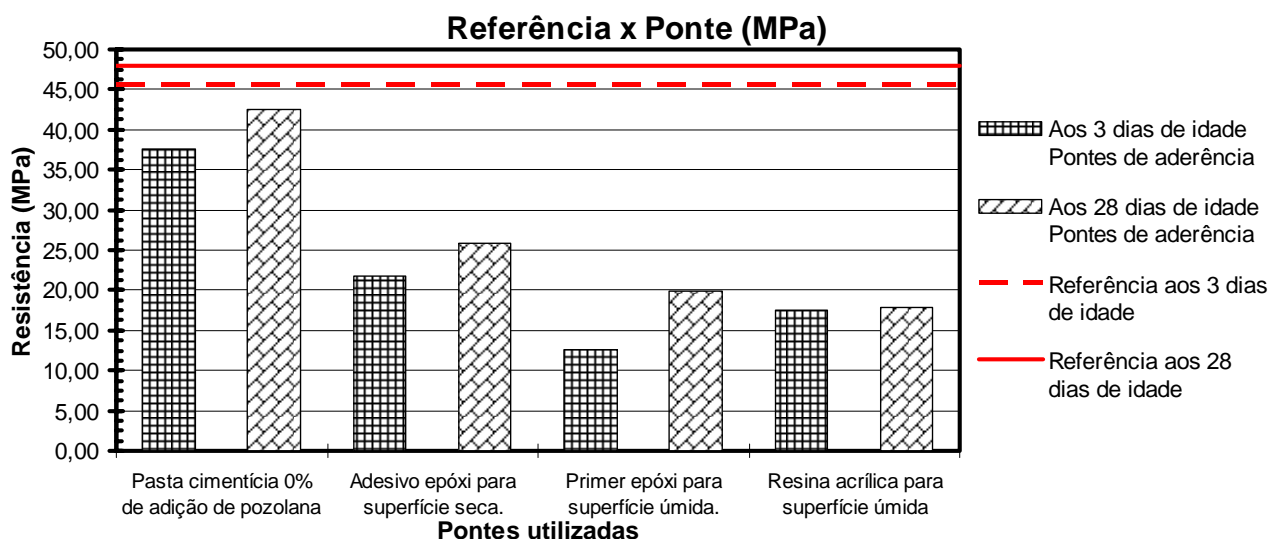


FIGURA 6: Comparação das resistências dos concretos de referência com as obtidas pelas respectivas pontes de aderência realizadas, para as idades de 3 e 28 dias.

Para uma avaliação mais precisa da eficiência dos adesivos aqui estudados, fez-se uso da porcentagem, sendo que o valor alcançado pelo concreto de referência, em determinada idade foi considerado como 100%. A TABELA 4 apresenta os valores dessa relação e a FIGURA 7 ilustra o desempenho aos 3 e 28 dias das pontes confeccionadas e relação à média das resistências dos cp's de referência.

ADESIVOS TESTADOS	Eficiência, em porcentagem			
	Aos 3 dias de idade		Aos 28 dias de idade	
	Pontes de aderência	Referência	Pontes de aderência	Referência
Pasta cimentícia 0% de adição de pozolana	82,37%	100,00%	88,73%	100,00%
Adesivo epóxi para superfície seca	47,86%		53,90%	
Primer epóxi para superfície úmida	27,75%		41,65%	
Resina acrílica para superfície úmida	38,62%		37,33%	

TABELA 4: Eficiência média dos exemplares, em porcentagem, aos 3 e 28 dias.

Da FIGURA 7 constata-se que todos os valores de resistência das pontes de aderência foram inferiores aos do concreto de referência. Assim como na análise das resistências, o melhor desempenho verificado foi da pasta cimentícia, a qual resultou em cerca de 82% e 89% da resistência do concreto de referência, para as idades de 3 e 28 dias, respectivamente. Tais dados são animadores, pois, apesar de estarem abaixo do nível de 90% estabelecido por Kriegh (1976) apud. [4], comprovam que o adesivo cimentício comportou-se muito bem frente às condições encontradas no substrato (encharcado). Dada à proximidade dos valores (89% - 90%), pode-se dizer que, aos 28 dias, a pasta cimentícia sem adição de qualquer pozolana estabeleceu aderência satisfatória entre o substrato e o concreto novo.

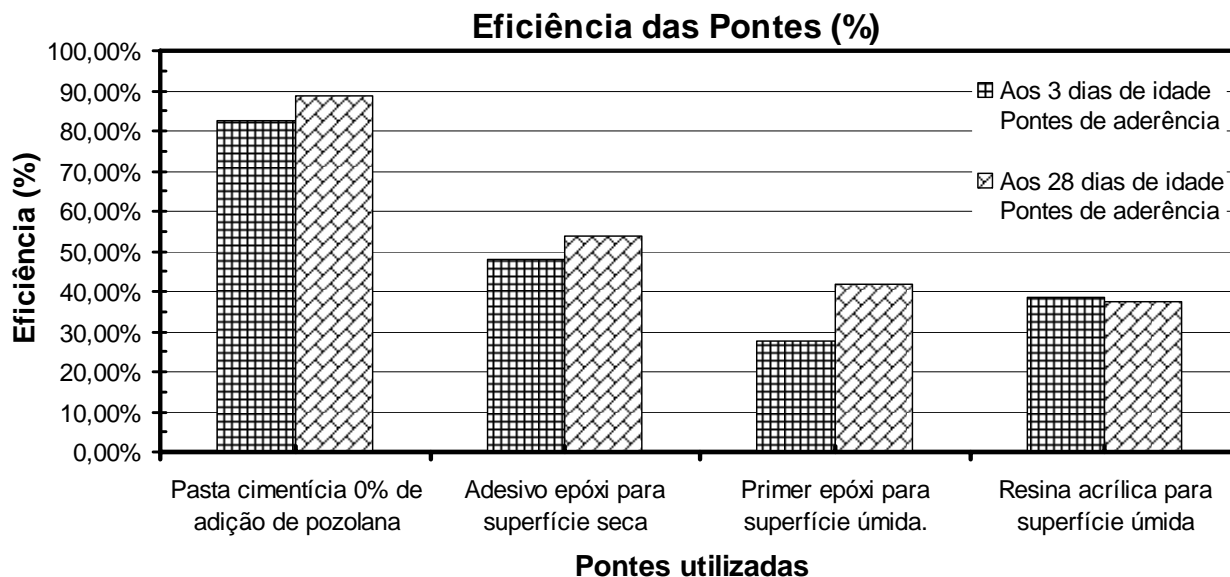


FIGURA 7: Eficiência das pontes de aderência em relação ao respectivo concreto de referência, em porcentagem.

Na FIGURA 7 comprova-se que o desempenho da pasta cimentícia foi bem superior aos demais, em todas as idades estudadas. Novamente, o adesivo epóxi para superfícies secas apresentou o melhor desempenho, aos 3 e 28 dias, entre os materiais epóxi e acrílico, alcançando cerca de 48% e 54% de eficiência, respectivamente às idades mencionadas. Aos 3 dias de idade, o pior desempenho foi do primer epóxi para superfícies úmidas com apenas 28%, aproximadamente. Aos 28 dias, o adesivo menos eficiente foi a resina acrílica para superfícies úmidas, ocorrendo, inclusive redução na sua eficiência em relação à mesma com 3 dias de idade. Isto se deve ao fato de que a resistência deste material praticamente não progrediu no período de 3 a 28 dias. Como a resistência do concreto de referência aumentou neste intervalo de tempo, a eficiência da referida ponte foi reduzida ao patamar de 37%, aproximadamente.

Essa ineficiência dos materiais industrializados pode ser explicada pelas condições em que se encontravam os substratos: saturados e com a superfície bastante úmida. Sabe-se, também, que há diferenças entre os módulos de elasticidade desses materiais e do concreto, o que pode ter influenciado negativamente o desempenho destes adesivos. Estes fatos não foram constatados para a pasta cimentícia, que se comportou de maneira satisfatória sob as condições supracitadas e ainda apresenta um módulo de elasticidade próximo ao do concreto do substrato.

Pode-se dizer que a pasta cimentícia sem adição de pozolana apresentou um desempenho de cerca de 35% superior ao adesivo epóxi para superfícies secas, produto que melhor desempenhou a sua função dentre os ditos industrializados, para ambas as idades estudadas.

4.2 ENSAIO DE ABRASÃO HIDRÁULICA

Em consonância com o ensaio de abrasão, foi realizado um ensaio de compressão axial nos materiais estudados com intuito de estabelecer uma possível relação entre as suas resistências à compressão e ao desgaste.

4.2.1 Resistência à compressão axial

Devido ao número de fôrmas e à capacidade da betoneira serem limitados, várias betonadas foram realizadas. A resistência de projeto (fck) era de cerca de 20 MPa aos 28 dias de idade. A média das resistências dos espécimes aos 28 dias foi de 26,50 MPa. Os cp's ensaiados tinham, na ocasião de início do ensaio, 19 dias de idade.

Realizaram-se ensaios de resistência à compressão axial das argamassas de reparo às idades de 3, 7 e 28 dias com um par de corpos-de-prova cilíndricos de 5x10 cm para cada idade. Os resultados encontram-se na TABELA 5, a seguir. Os resultados, exceto para argamassa sem adição de pozolana, foram inconsistentes devido à alta tixotropia conferida pelas adições a estas argamassas. Isto dificultou a moldagem dos espécimes.

4.2.2 Resistência à abrasão das argamassas de reparo

Para a realização desses ensaios foi produzido um par de cp's de 300x50 mm para cada material e ensaiado por 72 horas em intervalos de 24 horas entre cada medição.

A média dos pesos dos corpos-de-prova para cada material é dada na TABELA 5.

IDADES (dias)	Resistência à compressão axial (MPa)			
	Pasta cimentícia com 10% de sílica	Argamassa sem adição (0%)	Argamassa com 10% de sílica ativa	Argamassa com 10% de metacaulim
3 dias	79,00	64,20	88,40	48,00
3 dias	64,80	43,30	88,50	51,50
7 dias	-- *	71,30	71,30	52,00
7 dias	-- *	77,40	85,60	45,80
28 dias	-- *	109,50	46,70	28,30
28 dias	-- *	96,80	48,00	20,40

* Não foram moldados mais cp's de pasta cimentícia devido à elevada tixotropia apresentada pelo material, o que dificultou a moldagem.

TABELA 5: Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial em cp's de 5x10 cm.

Na TABELA 6 apresentam-se as variações nos pesos dos materiais testados e uma expressão gráfica do ocorrido está exposto na FIGURA 8.

TIPO	MÉDIAS DOS PESOS DE DOIS CP's (gramas)			
	0 hora	24 horas	48 horas	72 horas
Referência - 20 MPa	7.692,5	7.415,5	7.262,0	7.166,0
Argamassa cimentícia	8.098,0	8.061,0	8.052,0	8.043,5
Argamassa cimentícia - 10% de sílica ativa	7.672,0	7.664,0	7.662,5	7.661,5
Argamassa cimentícia - 10% de Metacaulim	7.596,0	7.575,0	7.493,0	7.409,5

TABELA 6: Pesos médios registrados no decorrer dos ensaios.

A avaliação da perda de peso absoluta, por si só, não é tão ilustrativa. Vale ressaltar que a posição das curvas no gráfico é de pouca importância na análise; mais importante é avaliar a inclinação das curvas de cada material para visualização da evolução do desgaste por abrasão que cada material foi submetido. De acordo com a FIGURA 8, percebe-se que o concreto de referência apresentou um desgaste praticamente linear ao longo do ensaio. Em geral, com exceção da argamassa com metacaulim, o desgaste foi mais acentuado nas primeiras 24 horas de teste, como evidencia a FIGURA 8.

Outra maneira de se avaliar a resistência ao desgaste por abrasão é determinando a porcentagem de peso dos materiais perdida durante o ensaio. Assim, obtêm-se quantidades relativas de desgaste em função do peso de cada material, condicionando a uma comparação mais justa do desempenho de cada material, já que os pesos específicos de todos os materiais foram semelhantes entre si. A TABELA 7, e a FIGURA 9 destacam o desempenho da média de dois corpos-de-prova de cada material ensaiado.

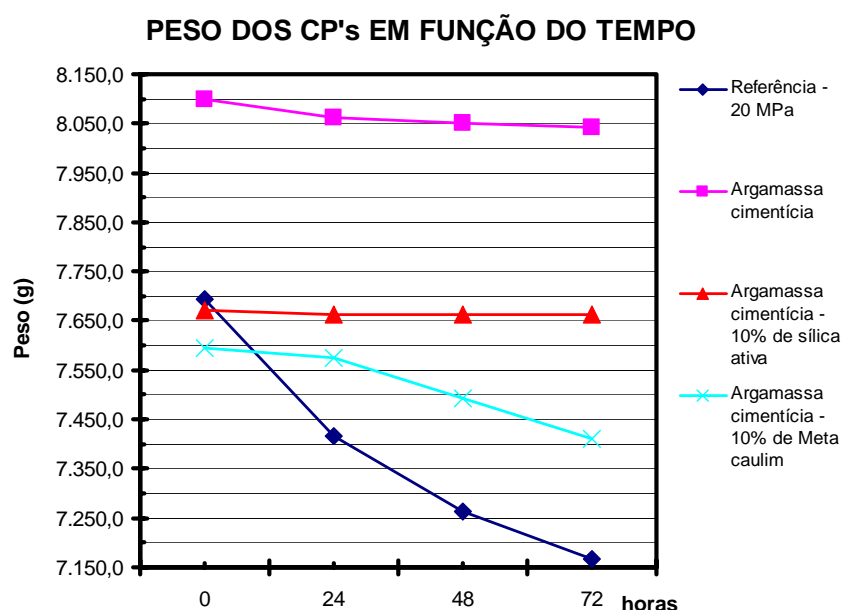


FIGURA 8: Variação do peso médio dos corpos-de-prova em função do tempo.

O mesmo comportamento revelado na FIGURA 8 é evidenciado na FIGURA 9, onde pode-se perceber que a argamassa com sílica ativa apresentou reduzido desgaste à abrasão hidráulica

Analisando a FIGURA 9 fica evidente que o maior desgaste aconteceu nas primeiras 24 horas, exceto com a argamassa de metacaulim, que se comportou muito bem neste período e depois apresentou desempenho muito aquém do esperado, com cerca de 90% do seu desgaste ocorrendo nas últimas 48 horas de ensaio.

Através da FIGURA 10 pode-se visualizar e comparar o desempenho de cada material em função do tempo.

TIPO	DESGASTE MÉDIO (%)			
	0	24	48	72
Referência - 20 MPa	0,00	3,74	5,93	7,35
Argamassa cimentícia	0,00	0,46	0,57	0,68
Argamassa cimentícia - 10% de sílica ativa	0,00	0,10	0,12	0,14
Argamassa cimentícia - 10% de Metacaulim	0,00	0,28	1,37	2,52

TABELA 7: Desgaste relativo acumulado, em porcentagem, em função do tempo de ensaio, em horas.

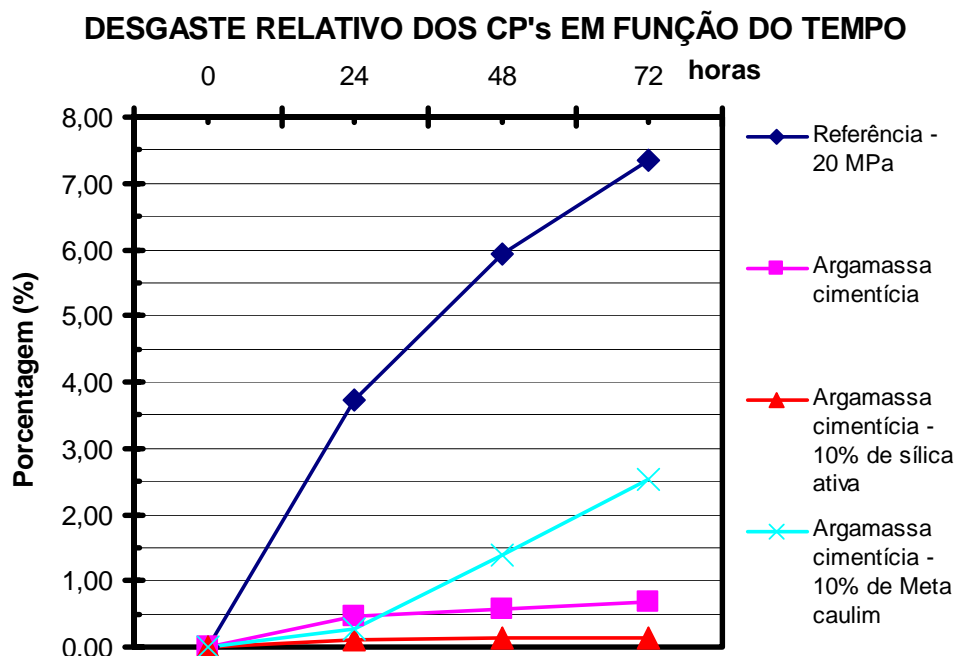


FIGURA 9: Desempenho dos corpos-de-prova ao longo do ensaio.

DESGASTE RELATIVO DOS CP'S EM FUNÇÃO DO TEMPO

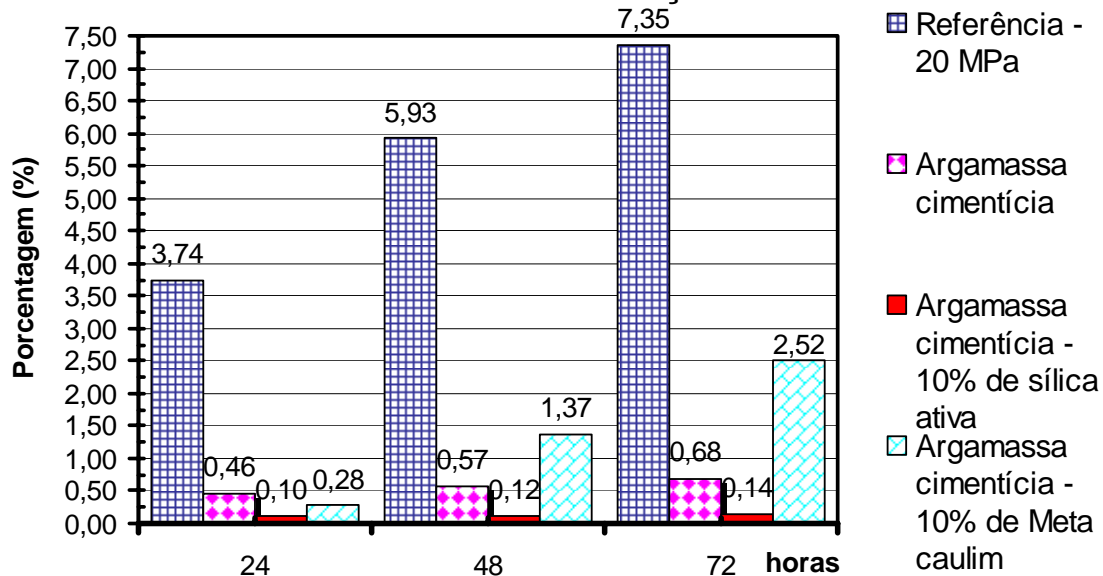


FIGURA 10: Evolução do desgaste, em porcentagem, com o decorrer do ensaio.

As resistências relativas à abrasão dos reparos produzidos, bem como do concreto utilizado como substrato, de referência, estão dispostas na TABELA 8, que apresenta, ainda, o traço utilizado para cada material e a respectiva idade de cada um no início do ensaio.

Apesar de terem sido utilizados materiais diferentes, é importante tentar estabelecer uma pequena correlação entre a resistência ao desgaste, a relação água/aglomerante (a/aglom.) e a idade. Esta correlação está representada na FIGURA 11, onde nota-se que a idade pouco influenciou nos resultados e o desgaste por abrasão hidráulica é diretamente proporcional à relação a/aglom., isto é, quanto menor esta relação, menor o desgaste do material.

MATERIAIS UTILIZADOS	Resistência à abrasão de cp's de 300x50 mm às 72 horas de ensaio (% em peso de material retirado por desgaste)	Traço unitário, em peso aglom.:areia:pedra (no concreto): a/aglom.: %aditivo (quando houver)	Idade dos cp's no início do ensaio de abrasão (dias)
Concreto de referência (substrato): 20 MPa	7,35%	1:1,81:3,34:0,65	19
Sem adição (0%)	0,68%	1:2,02:0,29:0,90%	13
10% de sílica ativa	0,14%	1:2,09:0,25:0,89%	20
10% de metacaulim	2,52%	1:2,24:0,40:1,58%	17

TABELA 8: Resultados dos ensaios de abrasão das argamassas de reparo e do concreto do substrato às 72 horas.

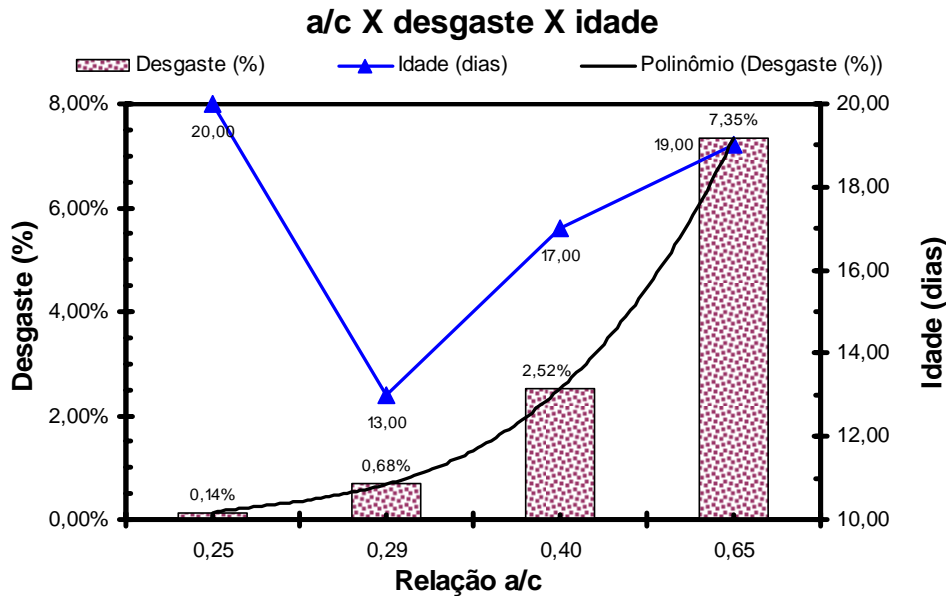


FIGURA 11: Relação entre o desgaste, a relação a/aglom. e a idade.

A argamassa que apresentou melhor desempenho final quanto ao desgaste foi a argamassa com adição de 10% de sílica ativa que foi cerca de 52 vezes mais eficiente ao desgaste que o concreto de referência. A argamassa sem adição apresentou desempenho satisfatório em cerca de 11 vezes quando comparado ao substrato. A argamassa com adição de 10% de metacaulim apresentou pior desempenho em relação às outras argamassas de reparo ensaiadas, contudo obteve valores de desgaste às 72 horas quase 3 vezes menores que a referência. Era esperado que as argamassas com adições minerais apresentassem desempenhos superiores à sem adição e ao concreto de referência, contudo isto ocorreu apenas em parte, pois a argamassa com adição de metacaulim obteve valores de desgaste muito mais elevados que às outras duas possivelmente pela diferença na relação água/aglomerante (0,40), que foi bem superior às demais. Ao final do ensaio (72 horas), percebe-se uma tendência direta entre a relação água/aglomerante e o desgaste médio sofrido pelos corpos-de-prova, isto é, o desgaste aumentou com o aumento da referida relação. Portanto, para os ensaios realizados neste estudo, a resistência à abrasão foi diretamente proporcional à compressão axial. Assim, percebe-se que a baixa relação a/aglomerante é bem mais influente positivamente na qualidade do material do que a simples adição de um material cimentício suplementar.

5. CONCLUSÕES

5.1 PONTE DE ADERÊNCIA

Em geral, as resistências dos cp's colados pelos adesivos estudados aumentou com a idade, bem como a resistência do concreto de referência, comportamento este já esperado. O mesmo não se pode afirmar das eficiências, em relação ao tempo, já que o desempenho da resina acrílica aos 28 dias foi aquém do obtido aos 3 dias. Todas as rupturas ocorreram no plano inclinado, isto é, na junta diagonal de adesão, entre o substrato e o adesivo, ressaltando, desta maneira, a importância das

condições de aplicação da ponte. Logo, uma correta preparação da superfície que receberá o reparo aumentará a probabilidade de sucesso do mesmo em relação à sua aderência.

Os adesivos industrializados recomendados para uso em superfícies úmidas apresentaram desempenho inferior ao sugerido apenas para superfícies secas. Todos estes adesivos obtiveram desempenhos aquém do considerado satisfatório, possivelmente pela elevada umidade do substrato e pelas já conhecidas diferenças entre seus módulos de elasticidade.

Por outro lado, o desempenho da pasta cimentícia sem adição de qualquer pozolana foi considerado satisfatório aos 3 e 28 dias, apresentando, também, os maiores valores de resistências para cada idade. Isto pode ser atribuído pela afinidade de compostos cimentícios com superfícies molhadas e pela semelhança nos valores de módulos de elasticidade com o concreto do substrato.

A eficiência da ponte de pasta cimentícia foi cerca de 35% superior à do adesivo epóxi para superfícies secas – que apresentou melhor desempenho entre os produtos “industrializados” – em ambas as idades estudadas.

5.2 ABRASÃO HIDRÁULICA

Quanto às resistências à compressão axial, as argamassas com adições foram prejudicadas pela moldagem deficiente dos corpos-de-prova de 5x10 cm, o que pôde ser verificado através do bom desempenho desses materiais quando submetidos à abrasão.

Logo as primeiras idades (3 dias) foram alcançadas altas resistências à compressão, ratificando a possibilidade de utilização desses materiais como uma boa solução para os reparos a serem utilizados nos tubos de sucção das casas de força da UHE de Curuá-Una.

Estabelecendo uma pequena correlação entre as resistências à compressão e à abrasão, pode-se dizer, com base nos dados contidos neste relatório, que existe uma relação fielmente direta entre ambas. Conseqüentemente, quanto menor for a relação água/aglomerante, menor será o desgaste do material.

Exceto para a argamassa com metacaulim, os desgastes foram mais acentuados nas primeiras 24 horas de ensaio, variando de cerca de 50% a 71% do desgaste final.

Todos os reparos foram sensivelmente melhores quanto à abrasão quando comparados ao concreto de referência, em especial a argamassa com adição de sílica ativa que apresentou desempenho em torno de 52 vezes superior ao de referência, configurando um reparo extremamente eficiente aos esforços de abrasão solicitados.

A argamassa sem qualquer adição mineral apresentou um ótimo desempenho à abrasão, provavelmente pela alta resistência alcançada, produto da baixa relação água/aglomerante. Os resultados deste material o credenciam a estudos mais detalhados, porém, para aplicações na vertical podem-se encontrar dificuldades de aplicação, pois essa argamassa não apresentou tixotropia suficiente para a

aplicação nessas condições. Porém isto pode ser, em parte, corrigido com a diminuição da relação água/aglomerante.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos espera-se que os materiais aqui especificados constituam um reparo prático, rápido e seguro para a patologia de abrasão no concreto de usinas hidrelétricas, prolongando, assim, a sua vida útil e restabelecendo ou mesmo aumentando os níveis de segurança exigidos para as estruturas de UHE's.

Por fim, ressalta-se que em função do nível de exigência da qualidade dos serviços prestados pelas empresas do setor elétrico, deve-se buscar a condição de falha zero nos sistemas de geração. Para que esta situação seja alcançada, são necessários investimentos para pesquisa e desenvolvimento tecnológico no que se refere à questão da segurança de estruturas civis nas usinas hidroelétricas. Estes investimentos são facilmente justificados em função do elevado grau de retorno, como benefícios para empresas do setor, no que diz respeito à garantia dos serviços prestados aos consumidores.

Usualmente, no caso de usinas hidroelétricas, os custos de estudos, projeto e execução de medidas visando um nível de segurança apropriado e uma adequada manutenção das estruturas são pequenos em relação aos prejuízos ocasionados por possíveis danos, além dos prejuízos causados pela redução ou interrupção na geração de energia elétrica.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe técnica do laboratório de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS pela realização dos ensaios de abrasão hidráulica e à Eng^a Civil M. Sc. Giorgiana Pinheiro, do Grupo Rede CELPA, concessionária de energia do estado do Pará, pelo apoio financeiro à pesquisa.

7. PALAVRAS-CHAVE

Reparo, Adesivos, Abrasão, Aderência, Desgaste.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BARATA, M. S, DE SOUZA, R. M. “Desenvolvimento de Novas Tecnologias de Reparo para o Problema de Cavitação e Abrasão no Concreto em Usinas Hidrelétricas”, Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, convênio Universidade Federal do Pará /Fadesp/Rede Celpa.
- [2] SANTOS, S. B. dos; ANDRADE, M. A. S. de; BITTENCOURT, R. M. Relatório DCT.T.01.112.2004-R0 – Universidade Federal do Pará – UFPA: Ensaios de Abrasão/erosão em corpos-de-prova de concreto com argamassa. Relatório Técnico. 6p. Novembro, 2004

- [3] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – Committee 210. Erosion of Concrete in Hydraulic Structures, ACI Materials Journal. Title nº 84-M17, p. 136-157, 1987. March – April.
- [4] GARCIA, S. R. A.; CLÍMACO, J. C. T. S. Eficiência da aderência de materiais de reparo para estruturas de concreto. In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais... Foz do Iguaçu - Paraná – Brasil. 2001. 11 p.