



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**JOSÉ RODRIGO SANTANA PINHO**

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE REPARO  
PARA O PROBLEMA DE ABRASÃO DO  
CONCRETO DE SUPERFÍCIES ÚMIDAS  
EM USINAS HIDRELÉTRICAS.**

Belém

2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**JOSÉ RODRIGO SANTANA PINHO**

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE REPARO  
PARA O PROBLEMA DE ABRASÃO DO  
CONCRETO DE SUPERFÍCIES ÚMIDAS  
EM USINAS HIDRELÉTRICAS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, orientada.

**Orientador: Remo Magalhães de Souza**

**Co-Orientador: Márcio Santos Barata**

Belém

2006



Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

PINHO, José Rodrigo Santana , 1980-

Avaliação de sistemas de reparo para o problema de abrasão do concreto de superfícies úmidas em usinas hidrelétricas / José Rodrigo Santana Pinho. - 2006.

Orientador: Remo Magalhães de Souza.

Coorientador: Márcio Santos Barata.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2006.

1. Concreto. 2. Resistência de materiais 3. Materiais de construção. 4. Abrasivos. 5. Usinas hidrelétricas. I. Título.

CDD 23. ed. 620.136



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**JOSÉ RODRIGO SANTANA PINHO**

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE REPARO PARA O  
PROBLEMA DE ABRASÃO DO CONCRETO DE  
SUPERFÍCIES ÚMIDAS EM USINAS  
HIDRELÉTRICAS.**

Aprovado em ..... de ..... de .....

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Ph.D. Remo Magalhães de Souza  
Presidente e Orientador/Universidade Federal do Pará

---

Prof. M.Sc. Márcio Santos Barata  
Co-Orientador/Faculdade Ideal

---

Profª. Dra. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias  
Examinadora - Universidade Federal do Pará

---

Profª. Dra. Isaura Nazaré Lobato Paes  
Examinadora - Universidade Federal do Pará

Belém

2006

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho, em tom de alegria e gratidão, a todas as pessoas que me acompanharam durante a minha vida acadêmica, professores, amigos e profissionais que me ajudaram a seguir este caminho. Em geral esta dedicatória é para todos aqueles que torceram e torcem pelo meu sucesso.

Assim, não posso deixar de dedicar esta dissertação ao Pai, que me deixou lúcido e saudável para eu e cumprisse minhas metas. Dedico imensamente este trabalho a minha família: meu pai, José Bernardo, minha mãe, Regina e minha irmã, Maria Elisa, que cuidaram para que eu chegasse onde eu cheguei. O mérito é de vocês também! Uma dedicatória especial é feita para minha namorada Cristiane, que não só me ajudou e me apoiou emocionalmente – quando as coisas pareciam ficar difíceis demais – como me ajudou efetivamente, na lista de referências e, ainda, sempre ajudando nos meus ensaios, sejam eles no horário que fossem! Bêbe, a sua contribuição foi, é e sempre será inestimável. Também, junto com os citados acima, gostaria de dedicar isto ao “ex- aluno de graduação”, hoje Engº Civil, mestrando da USP, Luís Antônio G. Bitencourt Jr., com o qual se formou uma grande e produtiva equipe de trabalho; dedicar também aos meus mestres, os professores Remo Magalhães e Márcio Barata pela atenção em me ensinar até um pouco mais do que eu precisava. Embora este espaço não seja de agradecimentos, preciso adiantar-me: MUITO OBRIGADO A TODOS.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus por minha saúde e pelas oportunidades que tive ao longo da minha breve existência.

Agradeço à minha família (pai, mãe, irmã, tios e primos) pelo saboroso conforto a mim oferecido, que me proporcionou tranquilidade para realizar este grande passo na minha vida acadêmica e profissional.

Agradeço todo o amor e força que me foram dados, com tanto entusiasmo pela minha querida namorada Cristiane Contente. A sua força me foi vital e o seu amor me fez buscar sempre fazer o melhor que eu pude.

Agradeço aos componentes do grupo de pesquisa do NICAÉ, pela ajuda e por todos os momentos que pude apreciar a vossa convivência. Agradeço, também, à acadêmica de Engenharia Civil Nívea Albuquerque que me ajudou demais na pesquisa. Ao professor Remo, um agradecimento especial pela oportunidade, conselhos, amizade e atenção que me foram dispendidos, que o caracteriza, professor, como um verdadeiro “paizão”. Ao meu amigo e “guru” Márcio Barata, com o qual tive a oportunidade de crescer academicamente, aprender coisas interessantíssimas e com certeza muito úteis para qualquer engenheiro. Nunca esquecerei as nossas conversas! Foi um prazer ser muito bem orientado por tão notável dupla, a qual contribuiu, de sobremaneira, para a minha formação acadêmica, profissional e pessoal. MUITÍSSIMO obrigado.

Agradeço aos professores membros da banca pela grandiosa contribuição e pela disposição do vosso precioso tempo em colaborar para o melhoramento deste trabalho.

Um agradecimento ao grupo Rede CELPA – Centrais Elétricas do Pará, que financiou a pesquisa através de projeto científico, em especial para a Eng<sup>a</sup> Civil Giorgiana Pinheiro, gerente do referido projeto, pela confiança demonstrada e toda a colaboração. Muito obrigado à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela ajuda no decorrer desta jornada.

Um profundo agradecimento à CIBRASA S/A e à CAUÊ Cimentos, entre outros que colaboraram com a pesquisa enviando materiais para a realização dos ensaios. Ao Eng<sup>o</sup> Mecânico M.Sc. Alan Vale e ao técnico Odilon pela disposição no desenvolvimento e construção da máquina ASTM C 1138.

Muito obrigado a todos os profissionais e pesquisadores que me auxiliaram na busca de bibliografias e no melhor entendimento do assunto em questão, em especial ao Engenheiro Francisco Andriolo.

Agradeço aos amigos e professores do curso de Mestrado (PPGEC) da UFPA por todo o companheirismo, convivência e por suas sugestões, as quais serviram para valorizar a pesquisa.

Agradeço aos amigos e companheiros da Companhia Docas do Pará, que sempre se mostraram solícitos e compreensivos durante a fase final desta dissertação, em especial ao Eng<sup>o</sup> Manoel Furtado e à arqt<sup>a</sup> Georginea Correia.

Ainda, preciso agradecer aos laboratoristas do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, em especial ao “Maneca” e ao Urbano, por toda a ajuda que me foi conferida. Agradecimentos ao “Vavá”, à Marli, Claudinha, “Dona Cleide”, Nelson, dentre outros que não estão citados aqui, mas estarão sempre presentes em minha memória.

*“Água mole em pedra dura, tanto bate  
até que fura!”*

*Ditado popular*

## RESUMO

PINHO, José Rodrigo Santana. Avaliação de Sistemas de Reparo para o Problema de Abrasão do Concreto de Superfícies Úmidas em Usinas Hidrelétricas. Belém, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Pará, 2006. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

A área de pesquisa em patologia das construções vem crescendo muito ultimamente, devido à degradação natural observada nos mais diversos tipos de edificações. Neste sentido, grande atenção vem sendo dispendida às estruturas de concreto de obras especiais como usinas hidrelétricas (UHE's) em virtude de sua complexidade e importância, tanto social quanto econômica. Uma das patologias que mais ocorrem nestas estruturas é a abrasão hidráulica do concreto, a qual pode levar a construção à ruína, em casos extremos. Este trabalho visa obter e analisar dados de vários materiais de reparo quanto à resistência à abrasão hidráulica e quanto aos seus respectivos sistemas de aderência. Dividiu-se a pesquisa em três grandes etapas: na primeira verificaria as características físicas e mecânicas dos materiais de reparo, a segunda analisaria a compatibilidade entre reparo e substrato através da aderência obtida no ensaio de compressão na junta diagonal e a terceira forneceria dados sobre a resistência à abrasão dos reparos através do ensaio ASTM C1138. Na primeira etapa foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e consistência dos concretos e argamassas utilizados como reparos profundos e superficiais para as idades de 3, 7 e 28 dias; Na segunda, aos 3 e 28 dias de idade, foram realizados os ensaios de aderência dos sistemas adesivos, abrangendo materiais cimentícios e à base de polímeros; Na última etapa foram utilizados os mesmos materiais de reparo da primeira: argamassas e concretos à base de cimento com e sem adição de pozolanas – sílica ativa e metacaulim – e argamassa à base de resina epóxi aos 3 e 28 dias. Como resultados, foram obtidas resistências à compressão axial entre 40 e 65 MPa para os materiais cimentícios aos 3 dias de idade e entre 60 e 80 MPa aos 28 dias, enquanto que para a argamassa epóxi a resistência foi de 20 MPa para ambas as idades. A consistência das argamassas foi tixotrópica, enquanto que a dos concretos foi bastante fluida. Quanto à aderência, realizou-se a aplicação dos adesivos em superfícies escarificadas, limpas e encharcadas, o que possibilitou uma expressiva vantagem dos adesivos à base de cimento e relação aos poliméricos, mesmo estes sendo indicados para colagem em substratos úmidos. Na etapa de abrasão dos reparos, utilizou-se uma nova metodologia de preparo dos substratos de concreto e posterior aplicação dos reparos, classificados em profundos ou superficiais. O reparo que apresentou maior resistência à abrasão foi o de argamassa epóxi. Não houve diferença estatística significativa entre os concretos sem adição e com adição de sílica ativa e metacaulim de alta reatividade. Em geral, o desgaste das argamassas, especialmente aos 3 dias, foi maior que o dos concretos, onde se verificou claramente a presença de dois estágios de taxa de desgaste em função da resistência à abrasão dos agregados graúdos. Assim, foi possível identificar diferentes estágios de desgaste para os concretos utilizados.

**Palavras-Chave:** abrasão, usinas hidrelétricas, reparos.

## ABSTRACT

PINHO, José Rodrigo Santana. Evaluation of Repair Systems for Humid Concrete Surfaces of Hydroelectric Power Plants Subjected to Abrasion. Belém, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal do Pará, 2006. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

The research field of construction pathology has been steadily growing lately due to natural degradation observed in different structures. In this sense, great attention has been devoted to special concrete structures such as hydroelectric power plants (HPP) because of their complexity and importance, socially as well as economically. One of the pathologies that is most found in these structures is hydraulic abrasion of concrete, which can lead, in extreme cases, structures to complete failure. The objective of this research work is to obtain and analyze test data of various repair materials regarding their resistance to hydraulic abrasion as well as their respective adherence systems. The research was divided into three phases: the purpose of the first phase was to investigate the physical and mechanical characteristics of the repair materials; the objective of the second phase was to analyze the compatibility between the repair material and the substrate through the evaluation of adherence by the slant shear test; Finally, the purpose of the third phase was to provide data about the abrasion resistance of the repair materials through the ASTM C1138 testing method. In the first phase, axial compression tests and consistence tests were performed with the concretes and mortars used as deep and superficial repairs at 3, 7 and 28 days. In the second phase, adherence tests were made, at 3 and 28 days, in the adhesive systems, which consisted of polymers and cement based materials. In the last phase, the same repair materials of the first phase were used: cement based mortars and concretes with and without pozzolanic addition – silica fume and high reactive metakaolin – and an epoxy mortar at 3 and 28 days of age. As results, axial compression strengths between 40 to 65 MPa were obtained for the cementitious materials at 3 days of age and between 60 to 80 MPa at 28 days. Meanwhile the epoxy mortar's strength was 20 MPa for both ages. The mortars' consistency was thixotropic, while the concretes ones were very fluid. Regarding the adherence tests, the surfaces were first scarified, then clean and wet, which provided a condition for the cementitious adhesives to perform much better than the polymeric ones, even for those that were recommended for adhesion in wet substrates. In the abrasion test phase, a new methodology was used to prepare the concrete substrates before the application of the repair materials. The repair that achieved the best results under abrasion was the epoxy mortar. No statistically significant difference was observed between the concretes with and without pozzolanic additions. In general, the mortars' wear, especially at 3 days, was larger than the concretes' wear, in which the presence of two stages of degradation rates were clearly verified, due to the abrasion resistance of the coarse aggregates. Therefore, it was possible to identify different stages of abrasion wear for the tested concretes.

**Key-Words:** abrasion, hydroelectric power plants, repairs.



## Sumário

|          |                                                                                                                                                                 |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                                                         | <b>17</b>  |
| 1.1      | CAUSAS DA ABRASÃO HIDRÁULICA .....                                                                                                                              | 18         |
| 1.2      | REPAROS NO CONCRETO SOB ABRASÃO .....                                                                                                                           | 20         |
| 1.3      | OBJETIVOS .....                                                                                                                                                 | 22         |
| 1.3.1    | <i>Objetivo Geral</i> .....                                                                                                                                     | 22         |
| 1.3.2    | <i>Objetivos Específicos</i> .....                                                                                                                              | 22         |
| 1.4      | JUSTIFICATIVA .....                                                                                                                                             | 23         |
| 1.5      | ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....                                                                                                                                      | 23         |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                                                                                                              | <b>25</b>  |
| 2.1      | O DESAFIO DOS REPAROS EM CONCRETO .....                                                                                                                         | 25         |
| 2.1.1    | <i>A Importância do Preparo da Superfície</i> .....                                                                                                             | 27         |
| 2.1.2    | <i>A Durabilidade dos Adesivos</i> .....                                                                                                                        | 30         |
| 2.2      | O CONCRETO QUANTO À ABRASÃO HIDRÁULICA .....                                                                                                                    | 34         |
| 2.3      | MANEIRAS DE REPARAR DANOS NO CONCRETO CAUSADOS PELA ABRASÃO<br>HIDRÁULICA .....                                                                                 | 40         |
| 2.3.1    | <i>Concreto de consistência seca (tamponamento)</i> .....                                                                                                       | 42         |
| 2.3.2    | <i>Concreto reforçado com fibras (CRF)</i> .....                                                                                                                | 42         |
| 2.3.3    | <i>Resinas epóxi</i> .....                                                                                                                                      | 44         |
| 2.3.4    | <i>Acrílicos e outros sistemas poliméricos</i> .....                                                                                                            | 45         |
| 2.3.5    | <i>Concreto ou argamassa projetada</i> .....                                                                                                                    | 47         |
| 2.3.6    | <i>Pintura</i> .....                                                                                                                                            | 47         |
| 2.3.7    | <i>Concreto com o agregado pré-colocado</i> .....                                                                                                               | 48         |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                                                                                                                                         | <b>49</b>  |
| 3.1      | 1ª ETAPA – CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE REPARO.....                                                                                           | 49         |
| 3.1.1    | <i>Materiais Cimentícios</i> .....                                                                                                                              | 49         |
| 3.1.2    | <i>Agregados</i> .....                                                                                                                                          | 52         |
| 3.1.3    | <i>Adições Minerais</i> .....                                                                                                                                   | 57         |
| 3.1.4    | <i>Argamassa epóxi</i> .....                                                                                                                                    | 63         |
| 3.1.5    | <i>Elaboração de Diversos Tipos de Argamassas e Concretos e Avaliação de suas Consistências</i> .....                                                           | 64         |
| 3.1.6    | <i>Avaliação da Resistência Mecânica das Argamassas e Concretos de Reparo para as Idades de 3, 7 e<br/>28 Dias e do Concreto do Substrato aos 28 Dias</i> ..... | 67         |
| 3.2      | 2ª ETAPA – ENSAIO DE PONTE DE ADERÊNCIA .....                                                                                                                   | 67         |
| 3.3      | 3ª ETAPA – ENSAIO DE ABRASÃO DOS REPAROS .....                                                                                                                  | 71         |
| 3.3.1    | <i>Preparação do Substrato</i> .....                                                                                                                            | 71         |
| 3.3.2    | <i>Aplicação dos Materiais de Reparo</i> .....                                                                                                                  | 74         |
| 3.3.3    | <i>Materiais de Reparo Utilizados</i> .....                                                                                                                     | 75         |
| 3.3.4    | <i>Metodologia do Ensaio de Abrasão</i> .....                                                                                                                   | 76         |
| <b>4</b> | <b>ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>                                                                                                                              | <b>78</b>  |
| 4.1      | 1ª ETAPA – CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS .....                                                                                                    | 78         |
| 4.1.1    | <i>Consistência dos Materiais de Reparo</i> .....                                                                                                               | 78         |
| 4.1.2    | <i>Resistência à compressão axial</i> .....                                                                                                                     | 81         |
| 4.2      | 2ª ETAPA – PONTE DE ADERÊNCIA .....                                                                                                                             | 86         |
| 4.3      | 3ª ETAPA – ABRASÃO DOS REPAROS .....                                                                                                                            | 96         |
| 4.3.1    | <i>Resistência à Abrasão aos 3 Dias</i> .....                                                                                                                   | 98         |
| 4.3.2    | <i>Resistência à Abrasão aos 28 Dias</i> .....                                                                                                                  | 105        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>                                                                                                                                          | <b>113</b> |
| 5.1      | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....                                                                                                                                      | 113        |
| 5.2      | SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....                                                                                                                          | 116        |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                                                                                                          | <b>117</b> |

|    |                                                                                                                                    |     |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7  | BIBLIOGRAFIA. ....                                                                                                                 | 124 |
| 8  | APÊNDICE A – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CP’S DO ENSAIO DE PONTE DE ADERÊNCIA.....                                          | 132 |
| 9  | APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CP’S DO CONCRETO DO SUBSTRATO.....                                                 | 133 |
| 10 | APÊNDICE C – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS MATERIAIS DE REPARO AOS 3, 7 E 28 DIAS.....                                              | 134 |
| 11 | APÊNDICE D – PLANILHA DE CAMPO DOS ENSAIOS DE ABRASÃO AOS 3 DIAS. ....                                                             | 136 |
| 12 | APÊNDICE E – PLANILHA DE CAMPO DOS ENSAIOS DE ABRASÃO AOS 28 DIAS. ....                                                            | 137 |
| 13 | APÊNDICE F – ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVA) DE FATOR ÚNICO DOS RESULTADOS DE ABRASÃO PARA OS MATERIAIS DE REPARO. ....              | 138 |
| 14 | APÊNDICE G – ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVA) DE FATOR ÚNICO DOS RESULTADOS DE VELOCIDADE DE ABRASÃO PARA OS CONCRETOS DE REPARO..... | 146 |

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| figura 1 – (a) e (b) Cavidade na parede lateral de concreto do tubo de sucção da UHE de Curuá-Una, originada por fluxo hidráulico (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                                 | 17 |
| figura 2 – (a) Preparo do ensaio “Underwater Method”. Detalhe para as esferas de tamanhos variados e para a palheta de agitação (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho); (b) Esquema de disposição do teste.                                                                                                                                                                                                               | 20 |
| figura 3 – (a) aparelho de arrancamento com controle taxa automático; (b) execução do ensaio (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 29 |
| figura 4 – Tensão de ruptura da junta de topo em função do tempo de exposição ao ambiente úmido. Os pontos são resultados experimentais e as curvas são teóricas, baseadas nos resultados obtidos (FONTE: GLEDHILL; KINLOCH; SHAW, 1980 apud BOWDITCH, 1996 [adaptação nossa]).                                                                                                                                       | 32 |
| figura 5 – (a) Variação esquemática da energia de adesão (G) em função da difusão da água no adesivo, onde se percebe que há uma redução da energia de adesão em função da concentração de água (%); (b) Comparação dos valores experimentais com os obtidos do modelo proposto, ilustrando uma grande redução na energia de adesão em menos de 10 dias de imersão em água a 35 °C (FONTE: POPINEAU; SHANAHAN, 2006). | 33 |
| figura 6 – Perda de resistência dos adesivos expostos à água quente. (a) epóxi-novolac; (b) vinil-fenólico; (c) nitrila-fenólico; (d) epóxi-poliamida (FONTE: COTTER, 1977 apud BOWDITCH, 1996 [adaptação nossa]).                                                                                                                                                                                                    | 33 |
| figura 7 – Relação entre a velocidade de fluxo hidráulico e o tamanho das partículas transportadas (FONTE: ACI Manual 210, [s.d.] apud DE SOUZA [1983]).                                                                                                                                                                                                                                                              | 34 |
| figura 8 – Comportamento de distintos concretos à abrasão hidráulica através da ASTM C1138 (AGUADO <i>et al.</i> , 1996 [adaptação nossa]).                                                                                                                                                                                                                                                                           | 41 |
| figura 9 – (a) Aparência do cp após o ensaio. (b) Detalhe da oxidação das fibras (FONTE: KORMANN <i>et al.</i> , 2002).                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 43 |
| figura 10 – Seixo utilizado e passante na peneira de abertura de malha quadrada de 9,5 mm antes do processo de lavagem (à esquerda) e após o processo de lavagem (à direita) (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                      | 55 |
| figura 11 – Agregado graúdo lavado e peneirado, secando ao ar, abrigado de intempéries (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 56 |
| figura 12 – Recuperação da sílica ativa. (FONTE: AÏTCIN, 2000).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 58 |
| figura 13 – Difractogrametria da sílica ativa (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 59 |
| figura 14 – Termograma do rejeito da centrífuga (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 60 |
| Figura 15 – Difractogramas de Raio-x do Resíduo Caulinitico “in natura” e da Metacaulinita (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 61 |
| Figura 16 – Curva de distribuição granulométrica do metacaulim proveniente do resíduo da centrífuga (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                                                              | 63 |
| figura 17 – Sequência de preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de ponte de aderência. Vista Lateral (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                                                       | 69 |
| figura 18 – Aspecto da superfície dos cp’s após apicoamento e limpeza da superfície diagonal (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 69 |
| figura 19 – Cp na fôrma, após a aplicação do adesivo, prestes a ser complementado com concreto de alta resistência (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                                                | 69 |
| figura 20 – Diversos modos de aplicação dos adesivos utilizados na etapa de ponte de aderência (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 71 |
| figura 21 – Corte esquemático dos cp’s para o ensaio de abrasão: a) Concreto para reparos profundos; b) Argamassa para reparos superficiais (medidas em cm) (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                      | 72 |
| figura 22 – Desmoldagem dos cp’s do substrato após 20 horas de aplicado, destacando o uso e fôrmas de PVC próprias para a confecção destes cp’s (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                   | 73 |
| figura 23 – Aspectos da superfície dos cp’s do concreto de referência (substrato), após 20 horas de ensaio na máquina de abrasão ASTM C 1138 (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                                                                                                                                      | 73 |
| figura 24 – (a) Posicionamento dos cp’s dentro das fôrmas, inclinadas, antes da aplicação das argamassas; (b) aplicação da argamassa AAD M10% em corpo-de-prova com prévia aplicação de pasta cimentícia com adição de 10% de sílica ativa, em peso (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).                                                                                                                               | 74 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| figura 25 – Sequência de aplicação dos reparos profundos: (a) aplicação do concreto por derramamento; (b) adensamento do concreto através de golpes na lateral da fôrma de PVC; (c) aspecto do cp após moldagem, ilustrando a ausência de segregação e a superfície do topo nivelada (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).....                                                                   | 75  |
| figura 26 – Consistência, em mm, das argamassas de reparo pela NBR 7215 (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                                                                                                                                              | 79  |
| figura 27 – Apresentação gráfica das consistências dos CAD's obtidas (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 81  |
| figura 28 – Evolução das resistências das argamassas de reparo com o tempo (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 83  |
| figura 29 – Evolução das resistências dos concretos de reparo (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 84  |
| figura 30 – Evolução média das resistências dos materiais de reparo utilizados na pesquisa (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).....                                                                                                                                                                                                                                                            | 86  |
| figura 31 – Comparação das resistências dos concretos de referência com as obtidas pelas respectivas pontes de aderência realizadas, para as idades de 3 e 28 dias (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho)....                                                                                                                                                                                     | 87  |
| figura 32 – Evolução da média das resistências dos cp's dos 3 aos 28 dias de idade (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 89  |
| figura 33 – Ruptura dos cp's colados com materiais "industrializados", aos 3 dias de idade, na junta diagonal de colagem (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                                                                                              | 90  |
| figura 34 – Ruptura na ponte de aderência dos cp's colados com adesivo epóxi para superfícies úmidas, aos 28 dias de idade (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                                                                                            | 91  |
| figura 35 – Vistas do cp 05, colado com pasta cimentícia com adição de sílica ativa, aos 28 dias, denotando ruptura no concreto velho e no final da ponte de aderência. Apesar deste tipo de ruptura, o referido cp não foi considerado na análise dos dados devido à sua baixa resistência quando comparado aos demais (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho). ....                               | 91  |
| figura 36 – a) vista geral dos cp's colados com pasta cimentícia, aos 3 dias de idade; b) detalhe da ruptura destes cp's (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).....                                                                                                                                                                                                                               | 92  |
| figura 37 – Ruptura, aos 28 dias, dos cp's colados com pasta cimentícia com adição de metacaulim. a) cp 04; b) cp05 – o único deste tipo de material que apresentou ruptura no adesivo (aos 28 dias) e c) cp 06 (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                       | 92  |
| figura 38 – Ruptura usual de cp colado com adesivo epóxi para superfícies secas, aos 28 dias (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).....                                                                                                                                                                                                                                                           | 93  |
| figura 39 – Aspecto dos cp's de referência depois de rompimentos (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 93  |
| figura 40 – Comparação das resistências dos cp's colados com os do concreto de referência, dada em porcentagem, para as idades de 3 e 28 dias (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                                                                        | 96  |
| figura 41 – Cp's de AAD M10%: (a) CP 1, aos 3 dias, antes do início dos ensaios; (b) CP 6, aos 28 dias, após 12 horas de ensaio na máquina de abrasão hidráulica ASTM C 1138/97. Destaque para as fissuras de retração ocorridas na AAD M10% (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).....                                                                                                           | 97  |
| figura 42 – Evolução do desgaste médio dos materiais de reparo à idade de 3 dias. Destaque para as argamassas (linhas cheias) AAD 0%, com um desempenho muito aquém do esperado e a AE, que apresentou um excelente desempenho à abrasão, apresentando superfície quase intacta visualmente (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                          | 99  |
| figura 43 – Velocidade média de desgaste dos compósitos de reparo aos 3 dias, em micrometros por hora, evidenciando, de maneira geral, uma estabilização da velocidade de desgaste dos concretos a partir de 12 horas e ensaio, enquanto as argamassas presenciaram um acréscimo nas suas velocidades de desgaste a partir do mesmo período de tempo (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho). .... | 101 |
| figura 44 – Velocidade de abrasão dos concretos à idade de 3 dias, em mm x 10 <sup>-3</sup> /h. Destaque para a identificação dos dois estágios de desgaste (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).....                                                                                                                                                                                           | 102 |
| figura 45 – Corte esquemático dos cp's de concreto submetidos à abrasão hidráulica, mostrando os dois estágios (I e II) de desgaste (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                                                                                  | 102 |
| figura 46 – Aspecto final (após 72 horas de ensaio) dos espécimes de concreto de reparo: (a) CAD 0%; (b) CAD S10%; (c) CAD M10%. Não há diferença estatística entre a média destes materiais (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                          | 103 |
| figura 47 – Aspecto dos cp's de argamassas mais desgastados ao final do ensaio: (a) AE; (b) AAD 0%; (c) AAD S10%; (d) AAD M10%. Detalhe para o pequeno desgaste da argamassa epóxi e do exagerado desgaste da AAD 0%, que, logo nas primeiras 36 horas de ensaio, já expunha o concreto do substrato (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                  | 104 |
| figura 48 – Aplicação da AE em substrato úmido e inclinado, na tentativa de simular as condições de aplicação da argamassa em superfícies verticais. Nota-se que a AE escorre na superfície do cp de                                                                                                                                                                                           |     |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | abrasão, podendo inviabilizar o seu uso em superfícies não-horizontais (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 107 |
| figura 49 – | Evolução dos desgastes médios dos materiais de reparo à idade de 28 dias. Confirmando os resultados obtidos aos 3 dias, a AAD 0% apresentou o maior desgaste entre todos os materiais. Mais uma vez, a AE apresentou desgaste irrisório (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho). .....                                                                                                                                                                                                            | 108 |
| figura 50 – | Desempenho médio final dos materiais de reparo aos 3 e 28 dias, indicando uma evolução geral no desempenho dos materiais ao longo do tempo. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 109 |
| figura 51 – | Velocidade de abrasão para os materiais de reparo aos 28 dias. Destaque para o comportamento das argamassas, que, diferentemente dos concretos, apresentou aumento na sua velocidade (aceleração positiva); os concretos, no entanto, tenderam a apresentar 2 estágios de desgaste como aos 3 dias, porém, o aumento na resistência das suas “camadas fracas” (estágio 1) mitigou, de maneira geral, a identificação dos estágios mencionados acima (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho). .... | 110 |
| figura 52 – | Espécimes de 300x100mm de argamassas que mais sofreram mais desgaste ao final do ensaio: à esquerda, os cp’s ensaiados aos 28 dias e a direita aos 3; de cima para baixo: AE, AAD 0%; AAD S10% e AAD M10% (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                                                                                                            | 112 |
| figura 53 – | Espécimes de 300x100mm de concretos que mais sofreram mais desgaste ao final do ensaio. Acima: corpos-de-prova ensaiados aos 3 dias; abaixo: aos 28; da esquerda para a direita: CAD 0%, CAD S10% e CAD M10% (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho). ....                                                                                                                                                                                                                                         | 112 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CP I – 32. (FONTE: CIBRASA – Departamento Técnico).   | 50  |
| Tabela 2 – Características químicas, físicas e mecânicas do CP V – ARI utilizado na pesquisa. (FONTE: CAUÊ CIMENTOS)      | 51  |
| Tabela 3 – Características do seixo de Ourém utilizado nos concretos de reparo.                                           | 53  |
| Tabela 4 – Características do agregado graúdo lavado e peneirado.                                                         | 55  |
| Tabela 5 – Características da areia utilizada.                                                                            | 56  |
| Tabela 6 – Características físicas e químicas da sílica ativa utilizada.                                                  | 59  |
| Tabela 7 – Análises químicas das amostras do resíduo da centrífuga.                                                       | 62  |
| Tabela 8 – Características físicas do resíduo da centrífuga.                                                              | 62  |
| Tabela 9 – Resumo das propriedades do Metacaulim utilizado.                                                               | 63  |
| Tabela 10 – Argamassas utilizadas nesta etapa e suas dosagens, em massa.                                                  | 66  |
| Tabela 11 – Concretos utilizados na pesquisa e suas dosagens, em massa.                                                   | 66  |
| Tabela 12 – Pontes de aderência dos diversos sistemas de reparo e materiais constituintes.                                | 70  |
| Tabela 13 – Dosagem dos materiais, em peso, para produção do concreto do substrato para o ensaio de abrasão.              | 71  |
| Tabela 14 – Resumo dos materiais utilizados nos ensaio de consistência, resistência e abrasão.                            | 76  |
| Tabela 15 – Consistências das argamassas usadas, em mm.                                                                   | 78  |
| Tabela 16 – Resultados da consistência das misturas de concreto dos reparos, em mm.                                       | 80  |
| Tabela 17 – Resultados de resistência à compressão axial das argamassas de reparo.                                        | 82  |
| Tabela 18 – Resultados médios de resistência à compressão dos concretos de reparo.                                        | 84  |
| Tabela 19 – Resultados das resistências à compressão aos 3 e 28 dias dos materiais utilizados.                            | 87  |
| Tabela 20 – Eficiência dos materiais ensaiados em relação ao concreto novo, de referência.                                | 94  |
| Tabela 21 – Desgaste médio dos materiais de reparo aos 3 dias de idade, em volume desgastado e altura média de desgaste.  | 98  |
| Tabela 22 – Desgaste médio dos materiais de reparo aos 28 dias de idade, em volume desgastado e altura média de desgaste. | 105 |

## Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

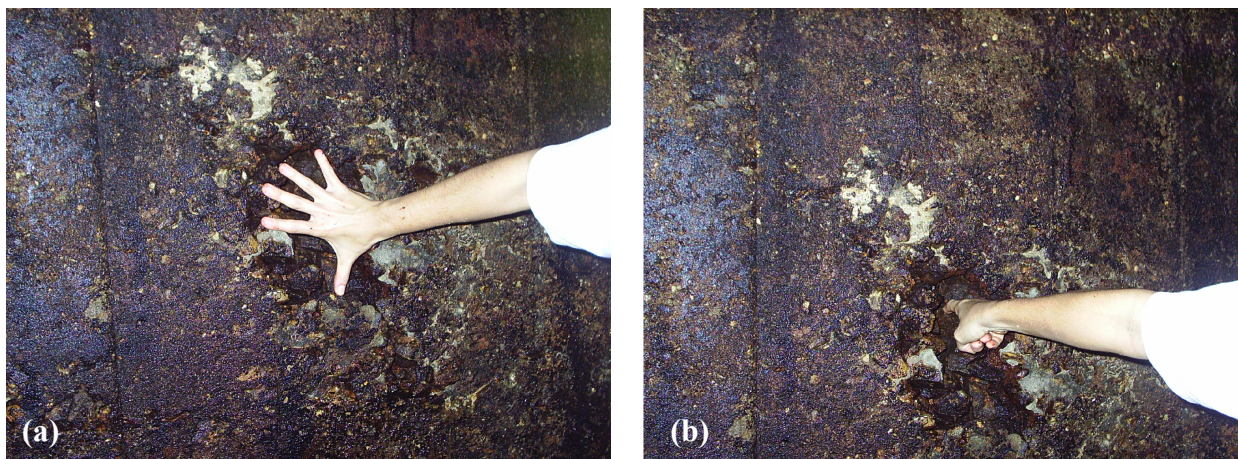
|            |                                                                                                                             |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| a/agl      | - Relação Água/Aglomerante.                                                                                                 |
| AAD 0%     | - Argamassa de Alto Desempenho sem Adição de Pozolana.                                                                      |
| AAD S10%   | - Argamassa de Alto Desempenho com Adição de 10% de Sílica Ativa em Substituição a Igual Peso de Cimento.                   |
| AAD M10%   | - Argamassa de Alto Desempenho com Adição de 10% de Metacaulim de Alta Reatividade em Substituição a Igual Peso de Cimento. |
| ABCP       | - Associação Brasileira de Cimento Portland.                                                                                |
| ABNT       | - Associação Brasileira de Normas Técnicas.                                                                                 |
| ACI        | - American Concrete Institute.                                                                                              |
| ANOVA      | - Análise de Variância (Estatística).                                                                                       |
| ASTM       | - American Standard for Testing Materials.                                                                                  |
| BT         | - Boletim técnico.                                                                                                          |
| CAD        | - Concreto de Alto Desempenho.                                                                                              |
| CADAM      | - Caulim da Amazônia S.A.                                                                                                   |
| CEB        | - Comitê Europeu do Beton.                                                                                                  |
| CIBRASA SA | - Cimentos do Brasil SA.                                                                                                    |
| CMP        | - Concreto modificado com polímero.                                                                                         |
| CP         | - Concreto Polimérico.                                                                                                      |
| CP I       | - Cimento Portland do tipo I.                                                                                               |
| CP II      | - Cimento Portland do tipo II.                                                                                              |
| CP V- ARI  | - Cimento Portland do tipo V, de Alta Resistência Inicial.                                                                  |
| Cp('s)     | - Corpo(s)-de-prova.                                                                                                        |
| CRF        | - Concreto Reforçado com Fibras.                                                                                            |
| DMC        | - Diâmetro Máximo Característico do Agregado para Concreto.                                                                 |
| d.m.s.     | - Diferença Mínima Significante Estatisticamente.                                                                           |
| Fck        | - Resistência à Compressão Axial Característica do Concreto. Resistência à Compressão especificada aos 28 dias de idade.    |
| Gz         | - Energia de Adesão do Adesivo (G) em Função da Espessura (z) do Adesivo.                                                   |
| MCAR       | - Metacaulim de Alta Reatividade.                                                                                           |
| MPa        | - Megapascal.                                                                                                               |
| NBR        | - Norma Brasileira Reguladora.                                                                                              |
| PVC        | - Polímero Cloreto de Polivinila.                                                                                           |
| RPM        | - Rotações Por Minuto.                                                                                                      |
| SBR        | - Polímero (Borracha) Estireno-Butadieno.                                                                                   |
| Tv.        | - Temperatura de Transição Vítrea                                                                                           |
| UHE('s)    | - Usina(s) Hidrelétrica(s).                                                                                                 |
| Va         | - Velocidade de Abrasão (mm x 10-3/h).                                                                                      |

## 1 Introdução

Estruturas de concreto são projetadas para terem vida útil compatível com a importância e o custo que lhe são dispensados quando das suas fases de projeto e execução. Entretanto, nos últimos anos, um novo campo de estudos e pesquisas vem se desenvolvendo rapidamente, quando comparado com os demais: o estudo das patologias e reparos das estruturas de concreto simples ou armado.

O elevado número de ocorrências de patologias nas estruturas de concreto recém-construídas está incitando os pesquisadores a investigarem as causas de tais prematuros problemas. Comparando-se com outras áreas de pesquisa como a corrosão de armaduras em concreto armado, ainda é incipiente a quantidade de dados sobre reparos de estruturas de concreto simples sujeitas aos esforços de erosão hidráulica em ambientes fechados, apresentando alta temperatura e umidade, e com a superfície do substrato no estado saturado, fator que limita a utilização de uma série de materiais.

No presente estudo foi avaliado o caso da UHE de Curuá-Una, no Oeste do estado do Pará, cujas estruturas de concreto armado da casa de força apresentavam sinais de danos por erosão hidráulica (figura 1).



**figura 1** – (a) e (b) Cavidade na parede lateral de concreto do tubo de sucção da UHE de Curuá-Una, originada por fluxo hidráulico (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

Como se sabe, as condições climáticas da região Norte do Brasil são bastante diferentes das do resto do país, pois, como principais singularidades, detêm-se valores de temperatura e umidade elevados. Tais valores influenciam as características finais dos produtos de recuperação comumente utilizados em serviços de reparos, pois uma grande parte dos materiais de base polimérica não polimeriza em presença de umidades elevadas, além do



tempo de utilização destes materiais ser reduzido pelas altas temperaturas, podendo inviabilizar o uso de determinado material devido à dificuldade de acesso aos locais comprometidos, muito comum em estruturas de casas de força de UHE's.

Há, também, a necessidade de rápida liberação da estrutura para serviço, pois paralisada, a estrutura da UHE deixa de gerar recursos para empresa. Portanto, além do prejuízo direto com gastos em serviços de recuperação e com a parada das turbinas, em um caso mais extremo, ocorrem os prejuízos indiretos pelos transtornos sociais e econômicos causados pela falta de energia. Vale ressaltar que, segundo a Lei de Evolução de Custos ou Lei de Sitter citada por Monteiro (2005), o custo dos reparos aumenta exponencialmente com o tipo de intervenção, o qual é função do tempo.

Com isso, propõe-se neste estudo o uso de materiais a base de cimento para recuperação das áreas danificadas por abrasão hidráulica, em virtude destes materiais serem hidrófilos e apresentarem facilidade na produção, com maior controle sobre suas propriedades, rápido ganho de resistência e custo relativamente baixo quando comparado a grates e resinas poliméricas (epóxis).

Segundo o CEB (1990) *apud* Andrade, J. (2005), uma estrutura de concreto deve ser projetada, construída e operada para manter, sob condições ambientais esperadas, sua segurança, funcionalidade e aparência mínimas por certo período de tempo. Diante dessa situação, pode-se definir o conceito de vida útil à estrutura de concreto, sendo esta função de vários parâmetros, inclusive o relativo às etapas de construção e projeto.

Outro aspecto a ser considerado é o meio ambiente, no qual devem ser acatadas as normas referentes à proteção ambiental, com elaboração de EIA (Estudo de Impacto Ambiental) /RIMA (Relatório de Impacto Ambiental). Assim, devem-se utilizar materiais que não agredam o ambiente, quando descartados.

## **1.1 CAUSAS DA ABRASÃO HIDRÁULICA**

A erosão por abrasão hidráulica resulta do efeito abrasivo de materiais sólidos transportados pelo fluido em movimento. Tais partículas podem ser de silte, areia, rochas entre outros, inclusive fragmentos da própria superfície (ANDRADE, T., 2005). Diversos autores (ANDRADE, T., 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2006; NEVILLE, 1997) se referem

ao termo abrasão quando as superfícies são desgastadas por atrito de partículas sólidas a seco e à erosão quando o atrito ocorre com a passagem de sólidos transportados em um fluido. No entanto, aqui, os termos “abrasão”, “erosão por abrasão” e “erosão” serão atribuídos à abrasão hidráulica, exceto quando mencionado contrariamente. Além do desgaste por abrasão, há a erosão dos materiais por cavitação, reconhecido pelo aspecto esburacado da superfície de contacto, e por ataque químico.

Reconhece-se o dano por abrasão hidráulica através da inspeção da superfície, a qual se apresenta lisa e plana, com aspecto desgastado. Condutos de evacuação, vertedouros, bacias de decantação e revestimento de túneis são locais onde a ocorrência desta patologia é comum (ACI 210, 1987).

O dano provocado pela abrasão depende das condições de fluxo e das partículas que ele transporta. Sob ação exclusiva da água, mesmo em altas velocidades, o concreto pode passar anos sem qualquer problema. Porém, com o atrito e impacto causado pelos sólidos em suspensão presentes em uma água fluindo em um conduto, a vida útil desse concreto é reduzida de acordo com as condições descritas acima (ACI 210, 1987).

Sob apropriadas condições de fluxo e transporte de sólidos, todos os materiais de construção usados correntemente nas estruturas hidráulicas apresentam certo degrau de susceptibilidade (ACI 210, 1987). Neville (1997) afirma que nem mesmo os melhores concretos suportam erosão severa por períodos prolongados de exposição. Deve-se, então, tentar controlar as propriedades geométricas do conduto, analisando o fluxo com modelos e instalando redes de proteção para impedir a passagem de detritos.

Existem vários ensaios padronizados para a medição da abrasão de superfícies. Andrade, T. (2005) cita que tais ensaios podem ser bastante proveitosos, pois permitem o estudo de mecanismos e o desenvolvimento de concretos mais resistentes. Entre os ensaios padronizados, pode-se destacar: *Rolling steel balls under pressure* (ASTM C 779); *Sandblasting* (ASTM C 418) e o ensaio de abrasão modificado (ASTM C 131 e C 535), além do teste CRD-C 63-80 do *U.S. Army Corps of Engineers: “Test Method for Abrasion-Erosion Resistance of Concrete (Underwater Method)”* que é um modelo mais realista da abrasão hidráulica e padronizado através da ASTM C1138. Os procedimentos do teste submetem os corpos-de-prova (cp's) à erosão por abrasão sob a ação de bolas de aço de esmerilhamento (figura 2). A velocidade da água na superfície do cp é aproximadamente 2,0 a 3,0 m/s e o



É importante ressaltar que reparos deste tipo sejam executados em um prazo muito curto de tempo, normalmente até 5 dias, pois, para a companhia geradora de energia, os lucros cessantes provocados pela parada de uma das turbinas são relevantes. Além dos gastos diretos com o reparo em si e com os prejuízos causados com a interrupção de receitas provenientes da geração de energia, somam-se as multas e desgastes sociais e econômicos gerados pela interrupção do fornecimento de energia à comunidade.

Mirza e Durand (1995), Hassan; Brooks e Al-Alawi (2001) relatam que a temperatura local e a umidade desempenham importantes papéis na aplicação e na qualidade (durabilidade) do sistema de reparo. A maioria dos materiais de reparo utilizados na construção civil tem o calor gerado por uma elevada temperatura ambiente como um catalisador de suas reações químicas, reduzindo assim, o seu tempo de aplicação (*pot-life*) e, algumas vezes, inviabilizando o seu uso devido a dificuldades de transporte e acesso ao local de aplicação (tubos de sucção, na ocasião). Por sua vez, a umidade elevada de tais lugares não é recomendada para uma vasta série de materiais poliméricos, cujas resinas não polimerizam em tais meios.

Mailvaganam (2004) reporta que a maioria dos estudos laboratoriais e teóricos existentes na literatura estabelece a influência de fatores de forma individual em relação à durabilidade dos reparos de concreto, exagerando a importância do fator em questão devido o comportamento destes materiais ser governado por várias variáveis simultaneamente quando posto em obra. O autor afirma que a recuperação e o reforço de estruturas apresentam o desafio único de efetuar as atividades de reparo com segurança e eficiência enquanto mantém a edificação em uso normal. Ainda, frequentemente, os serviços devem ser efetuados por técnicas não-convencionais de construção e em horários não tão adequados tecnicamente.

Além disso, o reparo considerado ideal deve possuir características mecânicas, e, conseqüentemente, de deformação (variação dimensional) iguais as do material que é feito o substrato, evitando, dessa forma, o aparecimento de indesejáveis tensões de cisalhamento na interface entre o reparo e o substrato, chamada de zona de transição<sup>1</sup>.

---

1 Esta expressão também é utilizada no estudo da microestrutura do concreto, sendo que esta denominação é dada para a zona de interface microscópica entre os agregados graúdos e a matriz cimentícia, formada por cimento, água e agregado miúdo. A mesma expressão será utilizada em ambos os casos, sendo que o local a que ela se refere deverá estar claro no corpo do respectivo texto.

Considerando-se o ambiente onde ocorrerão os reparos, a princípio é interessante o uso de materiais de base cimentícia em comparação com resinas epóxi, pois aqueles apresentam maior compatibilidade dimensional ao substrato de concreto dos tubos de sucção de usinas hidrelétricas.

De Souza (1983) afirma que: “a execução de reparos em estruturas hidráulicas muitas vezes apresenta grandes dificuldades para se obter um resultado adequado devido à localização dos danos e às condições de execução”.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é analisar o desempenho de diversos sistemas de reparo (substrato e adesivo + material de reparo) em estruturas de concreto de usinas hidrelétricas, do tipo tubo de sucção e caixa espiral submetidas à erosão por abrasão por fluxo hidráulico, com vistas a reduzir o máximo possível a periodicidade da paralisação para inspeção e manutenção dessas estruturas. Convém salientar que as condições para a execução dos reparos são bastante distintas das encontradas comumente em obras civis, pois a umidade nessas regiões é superior a 90%. O projeto é voltado para a situação encontrada na UHE de Curuá-Una, mas as condições obtidas poderão se estender para outras usinas.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

Avaliar o grau de deterioração das superfícies de concreto expostas às ações de erosão na UHE de Curuá-Una, com vistas a determinar quais os sistemas mais adequados para a execução dos serviços de reparo;

Caracterizar química, física e mineralogicamente alguns materiais de reparo a serem utilizados nos sistemas;

Avaliar preliminarmente algumas propriedades no estado fresco e no estado endurecido dos materiais escolhidos;

Avaliar preliminarmente o desempenho das pontes de aderência dos diversos materiais de reparo, simulando as condições encontradas no local;

Avaliar a resistência à abrasão dos diversos sistemas de reparo.

#### **1.4 JUSTIFICATIVA**

Somente a elevada importância social e econômica de uma usina hidrelétrica (UHE) já é suficiente para justificar plenamente o investimento em quaisquer pesquisas relacionadas à sua durabilidade. No entanto, vale ressaltar, também, que é grande o número de problemas de erosão em estruturas hidráulicas de concreto. A magnitude deste problema remete a situações por vezes preocupantes, visto que em muitos casos, houve um colapso de boa parte da estrutura afetada pela patologia, como nos casos das UHEs de Tarbela no Paquistão (AGUADO *et al.*, 1996), Glen Canyon (BURGI; ECKLEY, 1987), Kinzua e Dworshak (SCHRADER; TATRO, 1987), nos Estados Unidos, Karun no Irã (HOPPING; MASS, 1987); No Brasil, têm-se os exemplos de Ilha Solteira, Marimbondo e Jupia (ANDRADE; PAULON; SAAD, 1986), dentre outros.

Assim, especificamente para a UHE de Curuá-Una, a geração de energia para a cidade de Santarém, a maior do Oeste do estado do Pará é importante, pois, junto com a UHE de Tucuruí, elas são as principais fontes de energia, o que implica que qualquer parada nas máquinas pode gerar transtornos à população.

#### **1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

A estrutura textual da dissertação está dividida em cinco capítulos, para uma melhor explanação do assunto. O Capítulo 1 (um) visa uma introdução no tema proposto nesta obra, relatando brevemente as causas de ocorrência da abrasão e alguns tópicos sobre os reparos no concreto sobre abrasão, esclarecendo, também, os objetivos gerais e específicos da pesquisa e a justificativa, além desta síntese de cada capítulo, com o objetivo de orientar o leitor para uma melhor compreensão do texto.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica relacionada, contendo os assuntos e análises necessários para a elucidação das ocorrências técnicas coletadas durante os ensaios

de laboratório realizados. Em especial, este capítulo versa sobre as dificuldades na escolha dos materiais e de suas propriedades nos estados fresco e endurecido, com suas implicações na aplicação e durabilidade dos materiais em meio quente e saturado. Além disso, estão, da mesma forma, relacionadas bibliografias sobre as respostas frente à erosão por abrasão de concretos de diferentes dosagens e situações. Há uma coletânea de maneiras de se reparar danos no concreto causados pela abrasão hidráulica.

O Capítulo 3 (três) apresenta a metodologia utilizada nos ensaios laboratoriais, assim como a quantidade de materiais utilizados em cada ensaio e suas propriedades. Também é apresentada, em resumo, a concepção de produção da máquina de abrasão segundo as normas da ASTM C1138/97.

No capítulo 4 (quatro) são discutidos os resultados, as conseqüências e as respostas para os dados obtidos, embasadas na revisão bibliográfica estudada.

O Capítulo 5 (cinco) sintetiza as análises realizadas no capítulo anterior e conclui sobre os resultados da pesquisa, sugerindo pontos para estudos posteriores.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 O DESAFIO DOS REPAROS EM CONCRETO

Recomendar um material de reparo estrutural ideal significa encontrar o material de menor custo que consiga restabelecer as condições mínimas de utilização para determinada peça, levando em consideração as solicitações às quais ela estará submetida.

Para que um reparo seja considerado ideal, teoricamente não deverão ocorrer descontinuidades nas transferências de tensões, deformações e agentes agressivos entre ele e o substrato porque, deste modo, não se gerariam tensões concentradas na interface entre ambos os materiais, por motivo de esforços mecânicos e de variações dimensionais. Tal concentração de tensões pode fazer com que um material com excelentes propriedades mecânicas seja destacado do substrato, fato extremamente prejudicial para o caso específico de deterioração do concreto através de fluxo hidráulico.

Mesmo em condições de laboratório, controladas, é grande a complexidade envolvida na escolha e aplicação de determinado material de reparo, pois, além das características descritas acima, tal material deve apresentar consistência adequada, assim como é fundamental o correto preparo da superfície do substrato.

A eficiência dos adesivos utilizados é função tanto da sua própria qualidade quanto das condições da superfície do substrato. Diversas variáveis intervêm no resultado final de um processo de adesão entre um material cerâmico e poroso como o concreto e um novo material de reparo estrutural.

Ao realizarem vários ensaios de compressão na junta diagonal (*slant shear test*) em prismas de concreto com vários planos e materiais, Garcia e Clímaco (2001) constataram que as camadas adesivas de argamassa epóxi, argamassa comum e resina epóxi, além da junta sem qualquer adesivo se sobressaíram perante as demais, considerando-se a remoldagem feita com concreto. Nos prismas reconstituídos por argamassas com adições, os autores destacam o reparo com argamassa com adição de sílica ativa, sem aplicação de qualquer adesivo. Os autores concluíram que alguns materiais comercializados como adesivos foram prejudiciais à aderência, como as argamassas à base de cimento e fibras, à base de polímero SBR (estireno-butadieno) e a argamassa epóxi, sendo estas aplicadas segundo recomendação dos fabricantes. Deste modo, foi considerado notável o desempenho da argamassa de cimento comum, sem



aplicação de adesivo, configurando esta como uma boa opção devido ao baixo custo e técnica disseminada, além de possuir as propriedades mais próximas às do concreto comum.

Frigione; Aiello e Naddeo (2005) concluíram que a eficiência da junta de adesão diminui com o aumento da espessura da camada de adesivo aplicada. Porém, juntas com espessuras muito delgadas demandam um zelo muito grande quando da sua aplicação para prevenir a ocorrência de falhas.

Segundo Sprinkel e Ozyildirim (2000) *apud* Bonaldo; Barros e Lourenço (2005), valores de tensão de aderência maiores que 2,10 MPa indicam materiais com excelentes propriedades adesivas. Bonaldo; Barros e Lourenço (2005) estudaram a aderência de vários adesivos epóxi à tração direta para uso como adesivo para reparos com concreto reforçado com fibras de aço em lajes de concreto armado. Foram obtidas altas resistências à aderência, em torno de 3,0 MPa, com ruptura no substrato de concreto, logo abaixo da linha do adesivo. Os autores concluíram que a forma, tamanho (diâmetro máximo característico) e resistência dos agregados graúdos desempenham uma importante função no ensaio de tração direta tanto para os substratos com baixa e média resistência pois a fratura desenvolveu-se na interface dos referidos agregados com a matriz cimentícia, enquanto que para os concretos mais resistentes, a falha ocorreu através dos agregados.

Ao verificar a possibilidade de uso combinado de sílica ativa e látex estireno-butadieno para melhorar as propriedades da zona de transição entre os agregados e a matriz cimentícia dos concretos, Rossignolo (2004) concluiu que a atuação conjunta de ambos os materiais provoca a redução da espessura da zona de transição e a melhoria da qualidade dos produtos de hidratação do cimento portland, através da diminuição de hidróxido de cálcio na zona de transição e redução da porosidade. A respeito da ação da sílica ativa na melhoria da zona de transição, o autor considera que o uso de 10% de sílica ativa em relação à massa de cimento reduz a permeabilidade do concreto fresco, ocasionando um menor acúmulo de água nas superfícies (efeito parede), aumenta o número de núcleos de cristalização, os quais contribuem para a formação de cristais de hidróxido de cálcio menores e sem orientações preferenciais, além do efeito pozolânico da sílica ativa.

### 2.1.1 A Importância do Preparo da Superfície

Como citado anteriormente, é de essencial importância o correto preparo da superfície de concreto que receberá o adesivo e depois o novo material de reparo. Aguado *et al.* (1996) relatam que um reparo de qualidade deve começar com uma adequada preparação das superfícies de concreto que o receberão. Complementam, ainda, que os tratamentos das superfícies do substrato não visam unicamente eliminar as substâncias que as contaminam e dar-lhes rugosidade suficiente para incrementar a aderência, mas também eliminar as coberturas superficiais frágeis e modificar, inclusive, a natureza química destas para que se tornem mais reativas frente às moléculas do adesivo empregado.

Emmons (1993) atesta que a prática atual de reparos superficiais é muito mais complexa que a executada no passado, devido à, principalmente, teorias de projeto mais precisas, à aplicação de concreto em ambientes agressivos, à maior complexidade das estruturas, à grande variedade de materiais de reparo para aplicações específicas e maiores técnicas de aplicação destes materiais. O autor continua, ainda, ressaltando que o uso desses materiais requer um conhecimento preciso de suas propriedades no estado fresco e endurecido, em função dos esforços a que eles estarão submetidos, bem como dos adequados procedimentos de preparo da superfície do substrato e da sua aplicação.

De Souza e Ripper (1998) afirmam que a correta escolha do tipo de tratamento de superfícies, em função da patologia existente ou dos tipos de trabalho a realizar e materiais a utilizar são fundamentais na qualidade final do produto, tanto esteticamente quanto ao aprimoramento da aderência entre o reparo e o substrato.

Morgan (1996) alerta que, ao utilizar-se um método de escarificação mecânica como preparo de superfície, seja removida, posteriormente, com jato de areia ou água em alta pressão, a camada superficial obtida, pois esta pode conter argamassa e agregados graúdos fissurados, resultando em um plano de baixa resistência logo abaixo da linha de adesão. O pesquisador supracitado relaciona diversas obras em que ocorreram falhas de aderência pelo motivo exposto acima. Suprenant (1990) *apud* De Souza e Ripper (1998) alerta que a preparação da superfície do substrato por remoção mecânica do concreto danificado necessariamente danificará a capa de concreto sadio imediatamente após o material removido, sendo essencial que se danifique ao mínimo essa capa.

Ainda sobre o preparo da superfície do substrato, Silfwerbrand (1990) *apud* De Souza e Ripper (1998), após realizar testes de arrancamento para avaliar e comparar a influência dos tratamentos de superfícies apenas jateadas com areia e superfícies tratadas com escarificação e posteriormente jateadas com areia, concluiu que, comparativamente, a segunda fica mais bem preparada, porém mais susceptível à ocorrências de microfissuras na interface, o que acarretou rupturas sobre esforços mais baixos.

Algumas ocorrências importantes para o desenvolvimento da aderência entre reparo e substrato são citadas por Emmons (1993). Entre elas pode-se relacionar a limpeza e resistência do substrato necessárias para a aplicação do adesivo, a rugosidade suficiente para um engastamento mecânico entre o substrato e o adesivo (ou material de reparo em si), poros abertos na superfície para possibilitar esse engastamento e viscosidade suficiente do material de reparo (ou adesivo) para penetrar nesses poros.

Analisando a erosão de pastas de cimento, argamassas e concretos à erosão através do jateamento de areia, Momber (2000) relata que o ângulo de atrito das superfícies não tratadas é muito alto devido à alta porosidade da nata de cimento formada na superfície de contato com as fôrmas. A remoção desta camada deixa a superfície menos porosa, consequentemente prejudicando a aderência. Todavia, o jateamento com areia aumenta o ângulo de contacto das superfícies cortadas com serra. O autor comenta, ainda, que considerando somente as superfícies dos agregados planos, o aumento do ângulo de contato através do jateamento de areia é benéfico por dois motivos: i) o perfil microscópico de um grão de agregado pode ser modificado pelo impacto das partículas de areia, gerando uma microrugosidade na superfície e ii) os poros nos agregados graúdos podem ser abertos, ou estes podem apresentar microfissuras que atrapalham o movimento radial do fluido de teste.

Ao analisar a influência de polímeros na microestrutura e na aderência entre argamassas cimentícias e ladrilhos, Jenni *et al.* (2005) concluíram que a adição de polímeros na argamassa melhora tanto a resistência coesiva (na argamassa) quanto adesiva (na interface) devido à dispersão homogênea do látex na matriz cimentícia e que, antes do endurecimento da argamassa, há um fluxo de água para fora da mesma, em direção ao ladrilho. Por sua vez, a água próxima do substrato é aspirada para dentro deste por capilaridade. Este acúmulo desigual de água nas regiões de interface leva a uma redução na resistência de aderência na interface argamassa/ladrilho. Ainda, o preparo da superfície por escarificação também reduz a resistência de aderência.

Para determinar a compatibilidade, inúmeros pesquisadores vêm apresentando estudos sobre o desempenho de adesivos sob diversos tratamentos. Moreno Junior e Selmo (2001) destacam vários métodos de obtenção da resistência de aderência entre substratos e reparos, dentre os quais: resistência à tração direta (normatizado no Brasil), à tração na flexão, cisalhamento oblíquo por compressão, cisalhamento direto e na flexão. Os autores compararam os métodos de tração direta e cisalhamento na flexão. Nesta ocasião eles verificaram que o primeiro ensaio necessita de mais repetições para que o seu coeficiente de variação diminua e que, em ambos os ensaios, as resistências das argamassas de reparo aplicadas em substratos previamente preparados ora com água, ora com nata de cimento foram elevadas. Quanto aos tratamentos com água ou nata de cimento, não foram verificadas diferenças significativas.

Ao propor requisitos de desempenho para os adesivos estruturais, Mays (2001) atesta que o método de ensaio para verificação da aderência depende se o concreto a ser colado está no estado fresco ou endurecido, sugerindo que, para colagem de materiais frescos ao substrato (endurecido), seja utilizado o ensaio de arrancamento (figura 3). Porém relata, ainda, que pode ser utilizado o ensaio de compressão-cisalhamento na junta diagonal (*slant shear test*). Qualquer que seja o método empregado, o critério para avaliação do desempenho de aderência é qualitativo, sustentando-se na análise do local da ruptura: se ela ocorreu na junta, denotando aderência deficiente ou monolítica, proporcionada por uma aderência satisfatória.



**figura 3** – (a) aparelho de arrancamento com controle taxa automático; (b) execução do ensaio (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

Segundo Kriegh (1976) *apud* Garcia e Clímaco (2001), considera-se que o adesivo utilizado promoveu aderência satisfatória se valores de resistências dos cp's da ponte de aderência forem cerca de 90% ou superiores aos valores do concreto de referência. Nesta análise, o autor supracitado acredita que para tais valores a resistência de adesão é satisfatória

e a ruptura ocorre de modo monolítico, ou seja, o substrato, o sistema de aderência e o concreto novo, similar ao substrato comportam-se como um único material. Deste modo, a aderência na junta é maior que a tensão de ruptura no concreto. Tal afirmação é coerente pois, dependendo da metodologia utilizada, é provável que boa parte da superfície de contacto não seja preparada adequadamente, comprometendo os resultados obtidos.

### **2.1.2 A Durabilidade dos Adesivos**

De acordo com as novas tendências de padronização, o projeto de estruturas de concreto deve pautar-se em critérios de durabilidade predefinidos em função da importância da obra e do ambiente no qual ela estará inserida, além dos antigos critérios de resistência.

Da mesma forma, ao se projetar um reparo, deve-se considerar a vida útil desse reparo em função do grau de solicitação a que ele estará submetido e do grau de exposição a agentes agressivos, como água, produtos químicos em geral, calor excessivo e inclusive meios alcalinos como os concretos usuais. Conforme mencionado anteriormente, o primeiro passo para se obter um reparo durável é obter uma aderência satisfatória entre ele e o substrato; assim, a durabilidade dos materiais que compõem o adesivo utilizado para promover o monolitismo adequado entre o material de reparo e o concreto do substrato é fundamental para a durabilidade do sistema de reparo.

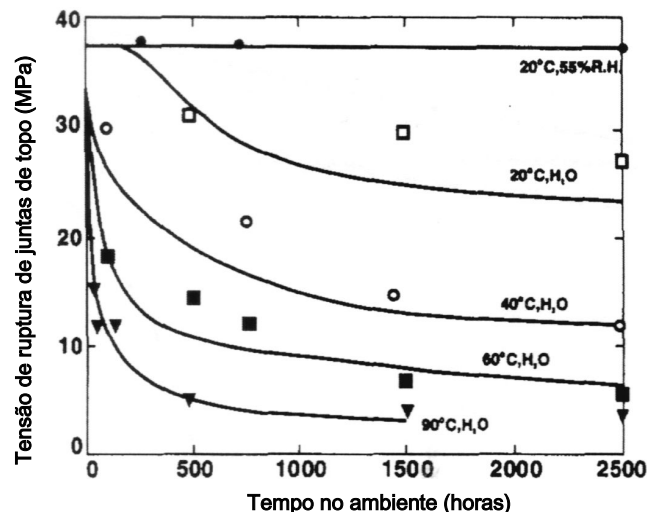
Conforme exposto, especificamente para o reparo de peças e estruturas de concreto e diante da enorme responsabilidade que um sinistro estrutural representa, a durabilidade dos materiais passa a ser um fator de extrema relevância para a nova vida útil da peça ou estrutura.

A aplicação dos adesivos a base de resinas poliméricas em superfícies de concreto de UHE's deve ser corretamente avaliada, pois sua durabilidade em presença de calor e umidade é extremamente prejudicada por ambos os fatores, haja vista que os adesivos atuais, segundo Frigione; Aiello e Naddeo (2005) possuem temperatura de transição vítrea ( $T_v$ ) em torno de 40 a 55°C, podendo ser reduzida, ainda, sob as condições citadas acima. Devido às altas temperaturas presenciadas na região Norte do Brasil, não é leviano dizer que a temperatura nas paredes de concreto das UHE's da região ultrapasse o valor mínimo de transição vítrea.

A presença de umidade é, provavelmente, o ambiente comum mais danoso para os materiais epóxi usados como adesivos na construção civil (BOWDITCH, 1996; FRIGIONE; AIELLO; NADDEO, 2005). Uma vez dentro dos adesivos, as moléculas de água podem alterar as propriedades do polímero tanto de maneira reversível, plastificando-o, quanto irreversível. Através de pontes de hidrogênio, as moléculas de água ficam aptas a quebrar as ligações de *Van der Waals* originadas do cruzamento das cadeias poliméricas do adesivo, gerando um aumento na mobilidade das moléculas. Callister Jr. (2002) comenta sobre vários fatores que influenciam a  $T_v$ , entre eles, pode-se mencionar o baixo peso molecular e a rigidez da cadeia polimérica, que é governada, principalmente, pela característica e densidade das ligações e ramificações.

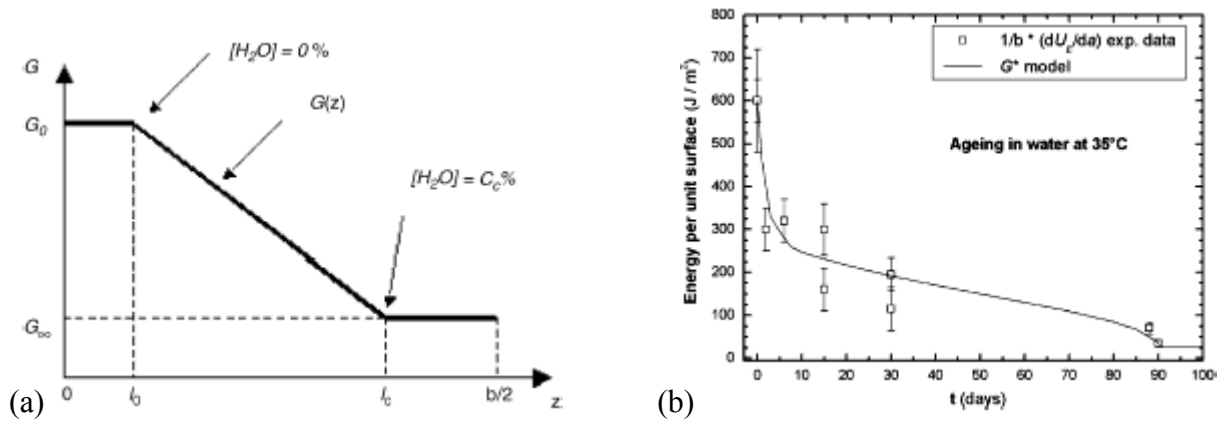
Frigione; Aiello e Naddeo (2005) ao estudarem os efeitos da absorção de água combinada com a elevação de temperatura na resistência à aderência de juntas de concreto coladas com adesivos epóxi, demonstraram que a redução na temperatura de transição vítrea ( $T_v$ ) destes materiais, devido imersão em água, pode se tornar um problema, pois pode resultar em temperaturas próximas de 38°C. Afirmaram, também, que a resistência de aderência desses adesivos pode ser reduzida em 30% com apenas um mês de imersão em água. Os autores concluem que, embora os materiais termorígidos e seus compósitos possam ser alternativas para a reabilitação e renovação de estruturas onde os materiais convencionais não são possíveis, eles estão longe de serem uma solução universal para qualquer tipo de deterioração dos materiais de construção.

Vários autores obtiveram dados de perda progressiva de resistência de juntas de topo coladas com adesivo polimérico com o aumento do tempo de exposição à água. A figura 4 ilustra esta perda, destacando que quanto maiores as temperaturas da água, maiores as perdas (GLEDHILL; KINLOCH; SHAW, 1980 *apud* BOWDITCH, 1996).



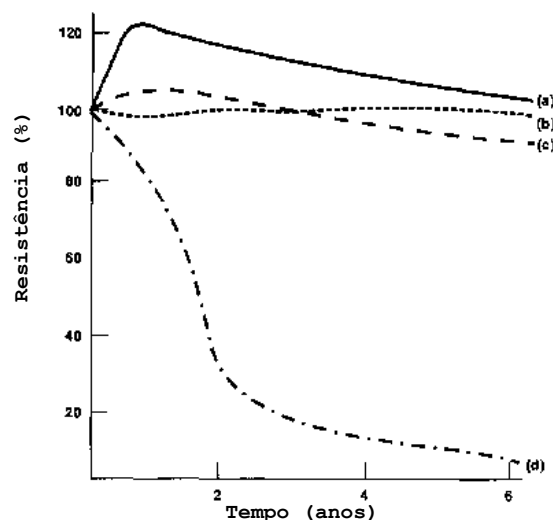
**figura 4** – Tensão de ruptura da junta de topo em função do tempo de exposição ao ambiente úmido. Os pontos são resultados experimentais e as curvas são teóricas, baseadas nos resultados obtidos (FONTE: GLEDHILL; KINLOCH; SHAW, 1980 apud BOWDITCH, 1996 [adaptação nossa]).

Popineau e Shanahan (2006) também destacaram que as propriedades físicas dos adesivos tornavam-se piores com o aumento do teor de água. Os referidos autores propuseram um modelo matemático simples que estimasse a energia de adesão ( $G$ ) entre o reparo e o substrato, dados vários tipos de falha e em função do tempo de imersão dos adesivos em água. Para avaliar a influência do teor de água nas características físicas dos adesivos, foram realizados ensaios de gravimetria nos materiais em uso através de ensaios de tensão de cisalhamento na torção e da energia de clivagem. A figura 5a representa as três zonas de estados de degradação diferentes, em função da extensão da frente de água no adesivo. A zona intermediária ( $G_z$ ) apresenta resistência média entre as duas zonas extremas devido à concentração de água nos “volumes elementares” do adesivo não ser suficiente para destruir por completo as ligações secundárias entre o adesivo e o alumínio. A figura 5b destaca a grande redução da energia de adesão em curtos períodos de imersão em água a 35°C, devido, segundo os autores supracitados, porque a frente de água inserida por difusão progride rapidamente e porque, ao mesmo tempo, a área “seca” possui uma energia de adesão ( $G$ ) muito maior que as outras áreas (molhadas). Assim, a energia de adesão, para curtos períodos de tempo é mais dependente da área “seca”.



**figura 5** – (a) Variação esquemática da energia de adesão ( $G$ ) em função da difusão da água no adesivo, onde se percebe que há uma redução da energia de adesão em função da concentração de água (%); (b) Comparação dos valores experimentais com os obtidos do modelo proposto, ilustrando uma grande redução na energia de adesão em menos de 10 dias de imersão em água a 35 °C (FONTE: POPINEAU; SHANAHAN, 2006).

Porém, a discussão sobre o comportamento de adesivos poliméricos em condições agressivas foi influenciada por Cotter (1977) *apud* Bowditch (1996), que relatou diferentes padrões de retenção de resistência, em porcentagem, obtidos após a exposição à água por anos, de vários adesivos poliméricos. Os adesivos a base de vinil-fenólico e nitrila-fenólico não foram essencialmente afetados durante o período de teste, enquanto o a base de epóxi-novolac apresenta um aumento de resistência seguido de um declínio da mesma. Contudo, o adesivo bastante hidrófilo a base de epóxi-poliamida perde resistência desde o início (figura 6).



**figura 6** – Perda de resistência dos adesivos expostos à água quente. (a) epóxi-novolac; (b) vinil-fenólico; (c) nitrila-fenólico; (d) epóxi-poliamida (FONTE: COTTER, 1977 *apud* BOWDITCH, 1996 [adaptação nossa]).



Assim, percebe-se que a discussão a respeito da durabilidade dos adesivos à base de resinas poliméricas é comum e importante, merecendo uma atenção especial quando da sua utilização em estruturas, principalmente estruturas de concreto de grande porte como usinas hidrelétricas, na qual o adesivo possivelmente estará sempre em contacto com ambientes saturados e perante temperaturas elevadas como as encontradas na região Norte do Brasil.

## 2.2 O CONCRETO QUANTO À ABRASÃO HIDRÁULICA

Neville (1997) afirma que as superfícies de concreto podem ser submetidas a desgaste em muitas circunstâncias. Logo, o estudo das propriedades dos concretos e de suas superfícies é fundamental para que as suas resistências ao desgaste sejam majoradas.

De Souza (1983) preconiza que a erosão por abrasão pode ser reduzida através de: emprego de concretos de alto desempenho, uso de agregados resistentes à abrasão e menor abatimento possível, com vistas a diminuir o teor de pasta na mistura. A figura 7 apresenta a relação da velocidade do fluxo de água no leito do condutor com o tamanho das partículas transportadas.

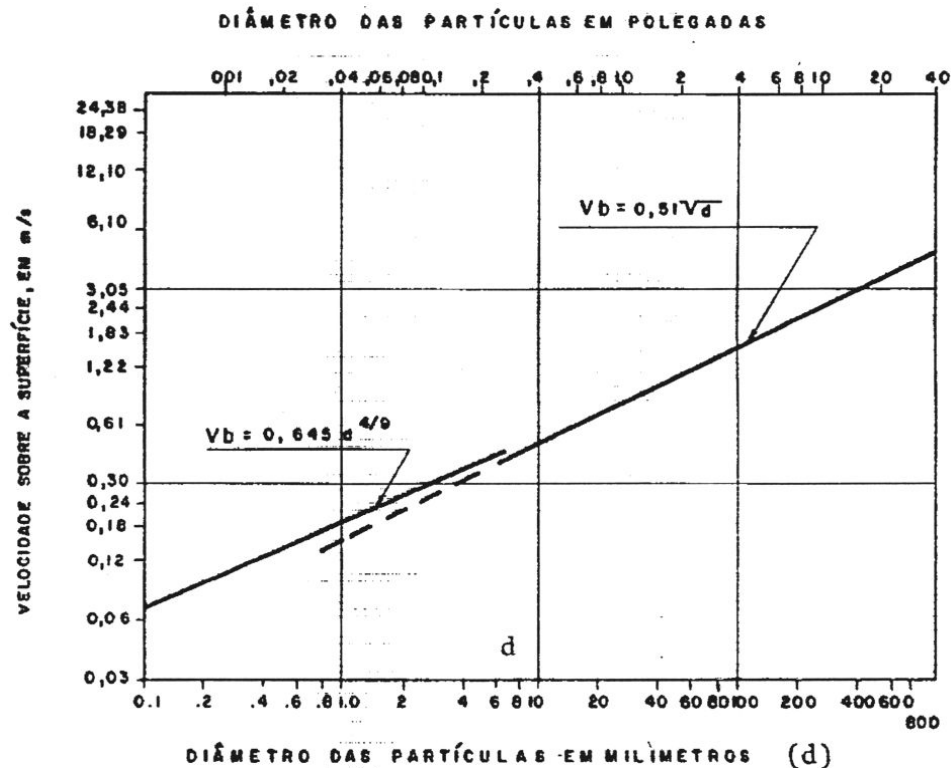


figura 7 – Relação entre a velocidade de fluxo hidráulico e o tamanho das partículas transportadas (FONTE: ACI Manual 210, [s.d.] *apud* DE SOUZA [1983]).

Muitos pesquisadores vêm obtendo dados sobre os danos e mecanismos de danos causados pela abrasão de partículas em superfícies dos mais variados materiais. ElTobgy *et al.* (2005) atestam este fato e propõem um modelo de análise por elementos finitos da abrasão de um material plástico rígido atingido por partículas duras a um determinado ângulo. Os autores analisaram que a primeira partícula, ao atingir o material, endurece-o através da deformação plástica imposta, sendo que as partículas seguintes removem o material endurecido. Foi usado, então, um modelo de abrasão considerando três partículas, após a observação da estabilização da taxa de erosão do plástico rígido. Os autores concluíram que o modelo de elementos finitos oferece a vantagem de modelar as tensões residuais geradas durante o processo de erosão e de estudar os efeitos do tamanho das partículas, velocidade e ângulo de impacto no momento do contacto.

A possibilidade de utilização ou de argamassa ou de concreto de alto desempenho deve ser seriamente estudada quando se tem um reparo em superfície de concreto a executar, principalmente em ambientes úmidos. A adição de pozolanas altamente reativas e a baixa relação a/c (água/cimento) fazem com que estes materiais sejam indicados para reparos, pois a baixa relação a/c faz com que o reparo não sofra grandes deformações por retração por secagem e, portanto, gerando tensões na interface reparo/substrato mínimas. Como os módulos de deformação e coeficientes de expansão térmica não são muito diferentes, a zona de aderência seria assumida como um material monolítico.

Amaral Filho (1998) *apud* Leonardo *et al.* (2002) afirma que aplicado em um concreto velho (substrato) com uma superfície limpa, rugosa e úmida, um concreto com sílica ativa confere uma aderência de 100%, com pequeno erro. A competitividade desses materiais é garantida pelo baixíssimo custo, versatilidade, fácil aplicação e preparo e uma técnica amplamente difundida.

Aguado *et al.* (1996) reconhecem que uma boa seleção do concreto a ser executado pode aumentar a resistência à erosão por abrasão do mesmo mas, por si só, este concreto não é capaz de eliminar os riscos de abrasão.

Mehta e Monteiro (2006) relatam que a pasta cimentícia não possui alta resistência ao atrito e que a vida útil do concreto pode ser reduzida sob situações de desgaste repetitivo, especialmente quando essa pasta apresenta alta porosidade ou baixa resistência. Baseados no Comitê 201 do Instituto Americano do Concreto (ACI 201), os autores citam que a resistência

do concreto deve ser de 28 MPa, no mínimo, para obter-se superfícies de concreto resistentes à abrasão. Contudo, onde há erosão severa, os autores recomendam o uso de concretos com  $f_{ck}$  igual a 41 MPa e cura úmida durante 7 dias, no mínimo. Os autores supracitados concordam com Andriolo (1984) e Neville (1997) quando preconizam que a camada superficial do concreto, mais fraca que o interior devido ao fenômeno de exsudação<sup>2</sup>, é de extrema importância para o desempenho do concreto à abrasão. Por isso, são recomendados vários tratamentos desta camada, como a aplicação de vácuo ou fôrmas absorventes para retirada do excesso de água da superfície (ANDRIOLO, 1984; NEVILLE 1997) e o uso de aditivos endurecedores de superfície (MEHTA; MONTEIRO, 2006)

Segundo Leonardo *et al.* (2002), a resistência à abrasão de um concreto está relacionada às suas características superficiais e resistência à compressão. Os autores destacam que a resistência ao desgaste é proporcional à resistência à compressão e depende muito da granulometria e da coesão do concreto; estabelecem que o consumo mínimo de cimento deve ser de 350 Kg/m<sup>3</sup> e afirmam que a umidade elevada facilita a segregação. Shah; Ahmad (1994) e Verçosa (1983) *apud* Leonardo *et al.* (2002) constataram que em concretos com resistências a compressão axial superior a 42 MPa, a influência do agregado graúdo na resistência à abrasão passa a ser mínima.

Fazendo cinco traços iniciais de CAD com relações água/cimento que foram de 0,28, 0,30, 0,32, 0,34 e 0,40, Leonardo *et al.* (2002) buscaram obter a máxima compacidade da pasta, a máxima resistência à abrasão e a melhor resistência de aderência. Desses cinco compósitos, o que apresentou maior consistência (4,5 mm) e maior resistência à abrasão (1,45%) foi o CAD com relação a/c de 0,32, do qual foi estudado o teor de pasta ótimo para a mistura. Tais teores variaram de 0%, 5%, 10% e 15% com vista de aumentar a trabalhabilidade da mistura. Com o aumento do teor de pasta de 10%, os autores obtiveram uma consistência de 20 mm aproximadamente, e com teor de 15%, aproximadamente 25 mm. Porém, acima de 10% foi observada uma segregação e abaixo de 5% uma coesão excessiva e baixa trabalhabilidade, configurando como sendo 10% o teor de pasta ideal para consistência. A resistência de aderência aumentou de 0% a 10% de acréscimo no teor de pasta e diminuiu depois, com 15%, tendo como ponto ótimo, novamente, o teor de 10%. A resistência à

---

<sup>2</sup> O termo exsudação se refere à separação da água do restante do concreto, devido, principalmente, à diferença entre seus pesos específicos. Isto faz com que a superfície dos concretos apresente mais água que o interior, levando a uma camada fina e porosa, com menor resistência.

compressão aos 28 dias de todos os traços com 0,32 de relação a/c ficou em torno de 60 MPa. Com o acréscimo de 10% no teor de pasta, a resistência à abrasão, em porcentagem de perda de massa foi de 0,96%, melhor, portanto que os 1,45% obtidos anteriormente. Como principal conclusão, o traço com relação a/c de 0,32 com acréscimo de 10% no teor de pasta foi o que obteve melhor desempenho.

A resistência à erosão por jateamento de areia da argamassa, do concreto convencional e do concreto convencional poroso pode ser convenientemente estimada com base na resistência à compressão e na fração de agregado graúdo. Ainda, a resistência à erosão é menor em pastas de cimento, pode-se aumentá-la com a inclusão de agregados miúdos e incrementá-la ainda mais acrescentando agregados graúdos (MOMBER, 2000).

Aguado *et al.* (1996) e Aïtcin (2000) destacam a utilização de concreto de alto desempenho em larga escala para reparar a bacia de decantação da Represa Kinzua, no oeste da Pensilvânia, EUA, a qual tinha sofrido sérios danos por abrasão. Chegou-se a um concreto com adição de sílica ativa e agregado calcário de 86 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de idade. Inspeções feitas com mergulhadores indicaram que o CAD apresentava desempenho como esperado (HOLLAND, **comunicação pessoal**, 1994 *apud* AÏTCIN, 2000).

A utilização de pozolanas altamente reativas é de extrema importância para o aumento de resistência à abrasão dos concretos e argamassas, primeiro porque o seu uso aumenta a própria resistência à compressão axial, principal fator responsável pela resistência à abrasão da mistura e, segundo, porque diminui a exsudação, melhorando a camada superficial do concreto. Mehta e Monteiro (2006) citam que o uso destes materiais em estruturas sujeitas à erosão vem aumentando.

Ao estudarem a influência da cinza volante na erosão por abrasão de concretos de alto desempenho, Yen *et al.* (2005) revisam diversas literaturas sobre o uso dessa pozolana e sua influência no desempenho dos concretos. Diferentemente de Naik *et al.* (1995), que afirmou que somente a partir de 30% de substituição de cimento pela cinza, em peso, seriam obtidas reduções no desempenho dos concretos, os autores concluem que essa redução ocorre com o percentual de 15% de substituição. Também verificam que a resistência à abrasão é direta e fortemente influenciada pela resistência à compressão, em comparação com teor de cinza volante.

Gjørv; Baerland e Ronning (1990) afirmam, como resultados de suas pesquisas, que: a qualidade dos agregados desempenha um papel crítico, principalmente em concretos com resistências mais elevadas; a qualidade da areia influencia a resistência à abrasão do concreto; a resistência à abrasão do concreto em condições úmidas é menor do que em condições secas, todavia esta diferença diminui quando se compara CAD's de maiores resistências. Um aumento de 50 Mpa para 100 Mpa na resistência à compressão fez com que a abrasão do concreto, grosso modo, fosse reduzida em 50 %. Concretos com resistências em torno de 150 MPa têm resistência à abrasão quase igual à do granito maciço.

Ao estudarem o desgaste nas superfícies hidráulicas de concreto, Dalfré Filho; Genovez e Paulon (2000) concluíram que o uso do granito e da gralha de aço permitiram a obtenção de um concreto resistente à abrasão, bem como o uso da sílica ativa e da nanosílica aumentaram a resistência à abrasão das misturas. Em especial, o concreto com o agregado granito e adição de sílica ativa e nanosílica foi o que obteve o melhor resultado nos testes. Todos os concretos e argamassas apresentaram relação a/c igual a 0,30.

Li *et al.* (2005) avaliaram a resistência à abrasão de concretos contendo nanopartículas de SiO<sub>2</sub> e TiO<sub>2</sub> e fibras de polipropileno e concluíram que os compostos obtiveram melhoras de desempenho à erosão quando adicionados com os materiais acima (não simultaneamente), porém o desempenho das nanopartículas, em especial a de titânio, foi bem melhor que o das fibras. Mais uma vez, o fator de maior importância para a resistência à abrasão foi a respectiva resistência à compressão.

Gulyas e Urbas (2004) compararam a resistência à abrasão de várias coberturas utilizando o método de ensaio ASTM C1138. As coberturas foram aplicadas nos cp's de concreto de referência, com resistência média de 44 MPa e agregados naturais. Conforme os resultados obtidos, a poliuréia aplicada por aspersão e a argamassa epóxi com agregados metálicos e naturais obtiveram desempenhos excepcionais, seguidos bem de perto pela argamassa cimentícia com agregados metálicos. Todos estes produtos foram muito melhores que o concreto de referência quanto à abrasão hidráulica. Todavia, os autores advertem que a escolha entre esses materiais se dará em função dos procedimentos de aplicação, os quais serão influenciados pelas condições de aplicação locais. Destacam, ainda que a poliuréia e a argamassa epóxi devem ser aplicadas em substratos **secos** e limpos. Além disso, esta apresenta a desvantagem da grande diferença entre o seu módulo de elasticidade e o do substrato.

Além do concreto de cimento Portland, o concreto feito com cimentos de aluminato de cálcio vem sendo utilizado na recuperação de estruturas hidráulicas submetidas à erosão (SCRIVENER; CABIRON; LETOURNEUX, 1999; VASCONCELOS, 2004). Vasconcelos (2004) cita que: “A resistência à compressão não é parâmetro definidor para a adequação de um concreto à ação abrasiva da água” e que concretos produzidos com cimentos de aluminato de cálcio e agregados sintéticos também compostos de aluminatos de cálcio produzem um concreto com resistências à abrasão próximas às das resinas epóxi e das chapas de aço. O autor cita os casos de emprego deste material nas barragens de Gebidem, na Suíça e Emosson, próxima à Mont Blanc, na França. Scrivener; Cabiron e Letourneux (1999) concordam com Vasconcelos (2004) e acrescentam que tal material possui resistência à abrasão comparada ou até melhor que os blocos de granito.

Scrivener; Cabiron e Letourneux (1999) afirmam que as características microestruturais responsáveis pela resistência ao desgaste dos concretos não são bem conhecidas. No concreto de alto desempenho a base de cimento Portland e sílica ativa, a resistência à abrasão aumenta pouco com o aumento da resistência à compressão, enquanto que nos concretos com cimento e agregados a base de aluminatos de cálcio, a resistência à abrasão é duas vezes maior para a mesma resistência à compressão daqueles. Este fato é atribuído à formação de uma excelente aderência entre o cimento e os agregados devido à reação química entre eles e à maior mobilidade dos íons aluminatos quando comparados com os de sílica, proporcionando maior concentração de hidratos na zona de transição entre os agregados e a matriz cimentícia.

Horszczaruk (2004) apresentou um modelo teórico para o desgaste por abrasão do concreto nas primeiras horas, no qual o desgaste é mais acentuado. Este modelo foi formulado com base em um aparato para obtenção de abrasão dos espécimes de concreto, descrito pelo autor nesta mesma obra. Para a modelagem em períodos mais longos, devem-se conhecer mais precisamente as propriedades do concreto e realizar mais experimentos. Ainda, ao realizar testes com concretos com e sem adição de cinza volante, o autor relata que a inclusão da cinza muda a estrutura de porosidade da matriz cimentícia e causa o decréscimo de hidróxido de cálcio, melhorando a adesão do agregado à matriz.

Horszczaruk (2005) destaca que o método de ensaio ASTM C 1138 é indicado para verificação da resistência à abrasão de concretos de alto desempenho (CAD's) com resistência à compressão aos 28 dias entre 80 e 120 MPa. Esta metodologia pareceu mais adequada para a obtenção de resultados compatíveis com as manifestações ocorridas na UHE de Curuá-Una.

Além do autor citado acima, vários outros (ANDRADE, T., 2005; MEHTA E MONTEIRO, 2006; NEVILLE, 1997) concordam que o ensaio padronizado ASTM C 1138 é o mais indicado para simular as condições de erosão por abrasão hidráulica do concreto.

### **2.3 MANEIRAS DE REPARAR DANOS NO CONCRETO CAUSADOS PELA ABRASÃO HIDRÁULICA**

Durante todo o período de funcionamento das diversas usinas hidrelétricas e condutores hidráulicos existentes, é comum o aparecimento de variadas patologias no concreto, provenientes de muitos fatores, desde as de origem química, de reações com os produtos de hidratação do cimento, até as oriundas de ações externas, como o desgaste por abrasão hidráulica.

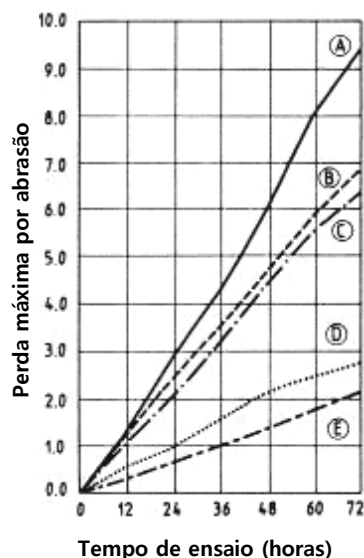
Assim, durante as últimas décadas, muitos materiais foram aplicados para recuperação das estruturas hidráulicas de concreto submetidas aos esforços de abrasão por fluxo de água contendo partículas sólidas. A metodologia de execução destes serviços também é muito variada, visto que as ocorrências podem demandar características e materiais não-convencionais.

A melhor solução para evitar ou reduzir os problemas de erosão por abrasão é a realização de um bom desenho hidráulico associado a medidas para regular o transporte dos sólidos carregados pelo fluxo de água (AGUADO *et al.*, 1996).

McDonald e Liu (1980) relataram as intervenções realizadas no dique de queda de água superior de Santo Antônio, nos Estados Unidos, nas quais cinco materiais diferentes foram testados sob praticamente às mesmas condições reais. Os autores utilizaram uma argamassa epoxídica de baixo módulo de elasticidade como camada de 13 a 25 mm de espessura para recobrimento do concreto convencional na proporção epóxi:areia silicosa de 1:3, usaram um concreto convencional com um adesivo epóxi como ponte de aderência, um concreto reforçado com fibras de aço, um concreto epoxídico de baixo módulo para seções de 305 x 610 x 152 mm e placas de aço resistente à abrasão de ½". Após dois anos de funcionamento, os reparos se encontravam da seguinte maneira: a argamassa e o concreto epoxídicos, ao contrário do que o próprio fabricante previra, comportaram-se muito bem, mesmo sob condições de aplicação adversas, os concretos convencional e reforçado com fibras falharam em dois anos de funcionamento, pois foram destruídos, em sua maioria e a placa de aço

mostrou um bom desempenho, com apenas um leve desgaste e com a porca de um dos parafusos de ancoragem perdida.

Aguado *et al.* (1996) destacam vários tipos de concreto que podem ser aplicados nos reparos de danos no concreto causados pela abrasão. Dentre eles pode-se citar: concretos convencionais, com resistência característica ( $F_{ck}$ ) em torno de 40 MPa e diâmetro máximo do agregado de 24 mm, com a utilização de pontes de aderência entre ele e o substrato; concretos de alta resistência, com  $f_{ck}$  superior a 80 MPa e adição de sílica ativa, como empregado na UHE de Kinzua (HOLLAND e GUTSCHOW, 1987 *apud* AGUADO *et al.*, 1996). Neste mesmo trabalho, os autores alertam que reparos com concretos com fibras de aço apresentaram maior desgaste quando comparados com concretos convencionais como os citados anteriormente. A figura 8 ilustra essa condição. Embora o reparo da abrasão hidráulica com concreto com adição de fibras de aço seja utilizado com certa frequência em várias usinas hidrelétricas, Holland (1983) *apud* Aguado *et al.* (1996) desaconselhou o uso deste material em uma das recomendações do Corpo de Engenheiros norte-americano. Por último, estes autores previram uma interessante utilidade dos concretos poliméricos (exceto o impregnado com polímeros, devido às dificuldades de aplicação, etc) por conta das suas elevadas propriedades mecânicas, versatilidade e facilidade na aplicação; contudo, naquela época seu emprego ainda era incipiente, provocado pelo custo elevado e pela limitação do trabalho sob água.



**A) Concreto reforçado com fibras.**

**B) Concreto convencional. Agregado calcáreo da Pensilvânia (39 MPa).**

**C) Concreto convencional. Agregado de Los Angeles (52 MPa).**

**D) Concreto de alta resistência com sílica ativa. Agregado de Los Angeles (79 MPa).**

**E) Concreto de alta resistência com sílica ativa. Agregado calcáreo da Pensilvânia (85 MPa).**

**figura 8** – Comportamento de distintos concretos à abrasão hidráulica através da ASTM C1138 (AGUADO *et al.*, 1996 [adaptação nossa]).



### 2.3.1 Concreto de consistência seca (tamponamento)

O concreto ou argamassa de consistência seca é aplicado em cavidades nas quais as suas profundidades sejam pelo menos tão grandes quanto suas larguras (ACI 210, 19987). Sua aplicação é feita com “socadores”, imprimindo uma pressão na argamassa ou concreto seco (*dry-pack*, em inglês), tamponando a cavidade.

De acordo com ACI 210 (1987), dosagens usuais para a argamassa seca consistem da proporção 1:2, ou seja, uma parte de cimento para duas partes de areia passando na peneira de malha quadrada 1,20 mm. Sua consistência ideal deve ser aquela que, quando posta na mão, não a suje, mas a deixe úmida. A resistência do produto final deve ser bem estudada, tanto pelos projetistas quanto pelos construtores.

Uma das vantagens deste tipo de reparo, além do baixo custo, é que há uma pequena variação dimensional da argamassa devido a sua retração por secagem, já que o teor de água é reduzido. Altas densidades são obtidas devido ao método de aplicação, contribuindo ainda mais para a aderência, além da compatibilidade entre os módulos de deformação do substrato e material de reparo. Como ponte de aderência pode-se utilizar material a base de látex (ACI 210, 1987).

Bastos e Câmara (2002) estudaram a tração na flexão e a tenacidade de concretos com consistência seca reforçados com fibras de aço para a fabricação em série de dormentes biblocos de concreto armado. Concretos com resistências de 40 e 60 MPa com teores de 30, 45 e 60 Kg/m<sup>3</sup> de fibras metálicas com 30 e 60 mm de comprimento foram fabricados, totalizando 12 compósitos. Os autores concluíram que os compósitos de consistência seca obtiveram menores índices de tenacidade e menores resistências mecânicas que os com a mesma composição, mas mais trabalháveis.

### 2.3.2 Concreto reforçado com fibras (CRF)

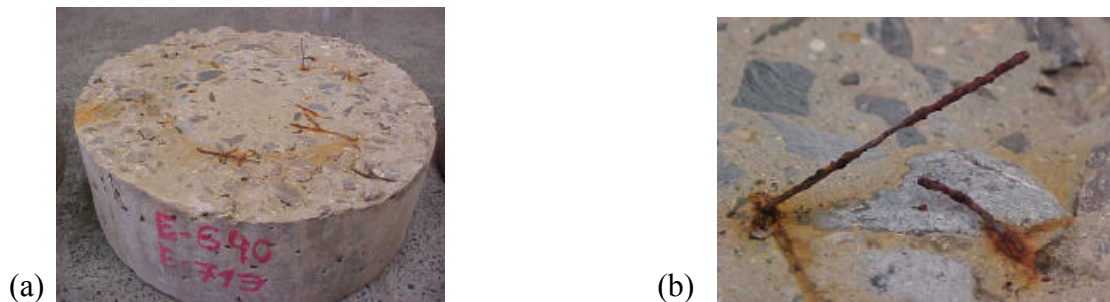
Visando aumentar a resistência do concreto à fadiga, erosões por abrasão e cavitação, cargas de impacto, resistência à flexão, capacidade de deformação, capacidade de carregamento após fissuração e aumento da resistência ao cisalhamento, incorporam-se fibras no concreto.

ICOLD (1982) *apud* ACI 210 (1987) descreve o uso de fibras em barragens. Em algumas situações o CRF foi bem sucedido até mesmo para uma combinação de efeitos de

abrasão e cavitação para grandes rochas transportadas a altas velocidades. Porém, testes laboratoriais mostraram que sob condições de baixas velocidades, com carregamento de pequenas partículas, a adição de fibras não foi benéfica e até mesmo prejudicial (LIU; MCDONALD, 1981) *apud* ACI 210 (1987).

No Brasil, inúmeros trabalhos são realizados a respeito da incorporação de fibras no concreto. Silva *et al.* (2000) realizaram concretos convencionais e de alto desempenho com fibras metálicas de comprimentos 28 e 35 mm e consumos, para ambas, de 40 e 50 Kg/m<sup>3</sup> e concluíram que as fibras metálicas influíram relativamente pouco na resistência à compressão dos concretos testados e podem levar a aumentos significativos nas resistências à tração, tanto indireta quanto na flexão.

Kormann *et al.* (2002) ensaiaram o CRF estudado para aplicação no vertedouro da UHE Capivara, em São Paulo, à abrasão, ao arrancamento, compressão axial entre outros e constataram que o material possui boa resistência à abrasão – em torno de 1,0% de perda de massa (figura 9a). Contudo, as fibras que ficaram na superfície de desgaste apresentaram oxidação, colocando em dúvida o seu desempenho real (figura 9b).



**figura 9** – (a) Aparência do cp após o ensaio. (b) Detalhe da oxidação das fibras (FONTE: KORMANN *et al.*, 2002).

Ainda segundo Kormann *et al.* (2002), dois procedimentos podem ser executados a fim de melhorar a corrosão nas fibras: ou realizar um acabamento posterior da superfície ou utilizar materiais não oxidáveis. Em função disto, foi realizado um reparo na laje do vertedouro da UHE Capivara para verificar a situação em campo. O reparo foi realizado com posterior acabamento da superfície do CRF, foi feito de maneira bem simples e após oito meses de exposição natural mostrou ser eficaz, aparentando não ter processo corrosivo instalado.

Figueiredo (2002) através de estudos sobre a retração em argamassas com adição de sílica ativa e fibras para reparos, concluiu que o teor de fibras empregado (6,0%) não apresentou desempenho favorável quanto ao desempenho à retração e fissuração, contudo apresentou boa plasticidade e compatibilidade com os demais componentes da argamassa e, finalmente, o sistema de reparo utilizado apresentou comportamento satisfatório e resultados coerentes com os obtidos para o ensaio de retração restringida realizado.

### 2.3.3 Resinas epóxi

As resinas epóxi são definidas como:

o nome genérico dado aos materiais com estruturas moleculares contendo átomo de oxigênio externo a dois átomos de carbono, por si só não são adesivas e, para tanto, devem ser misturadas com agentes endurecedores e de cura, em proporções tais que reúnam as propriedades necessárias para o projeto de reparo (KORMANN *et al.*, 2001).

Os autores acima mencionados citam, ainda, casos em que as resinas epóxi foram usadas como, no Brasil, nas UHE Capivara e Porto Primavera e no exterior, nas barragens Pomona e Enid nos EUA.

Segundo o ACI 210 (1987), o uso mais comum para as resinas epóxi é como adesivos, colando a maioria dos materiais de construção. Dentre as aplicações típicas do epóxi listam-se: a colagem entre os concretos novo e velho, colagem da argamassa seca, CRF, concretos poliméricos e até alguns concretos com látex endurecedor de superfície. Há algum tempo atrás essas resinas não polimerizavam e nem aderiam às superfícies molhadas ou úmidas; hoje, com o desenvolvimento da ciência dos materiais, há resinas de base epóxi que são indicadas não só para lugares úmidos, mas também para aplicações submersas (VILLALBA *et al.*, 2002).

A experiência tem mostrado que a aplicação de epóxi na superfície do concreto pode criar graves problemas quando em contato com fluidos em alta velocidade, pois, se a superfície do reparo com resina for muito lisa e plana, o fluxo neste local pode ser interrompido e então esta área pode ser considerada como uma irregularidade geométrica, levando à cavitação na área adjacente (ACI 210, 1987). Às vezes, o reparo pode ser tão resistente ao dano que o substrato erode, aumentando abruptamente (ou até criando) qualquer falha na geometria da superfície que tal situação chega a ser pior do que a original. Porém este problema pode ser facilmente resolvido com técnicas de acabamento ou ainda uma aplicação

de jato de areia para deixar a superfície adequada. Estes materiais têm uso limitado em estruturas hidráulicas (ACI 210, 1987)

Villalba *et al.* (2002) estudaram traços de argamassas convencionais e argamassas epóxi para reparos em ambientes úmido e seco, comparando as resistências à compressão axial e diametral, ao desgaste e ao arrancamento (aderência) e concluíram que: as resistências à abrasão das argamassas epoxídicas foram maiores que as de base cimentícia. A argamassa com epóxi para superfície úmida apresentou maior desgaste por abrasão do que a convencional (para superfície seca), embora tenha tido a maior resistência à compressão axial. Além disto, a argamassa com epóxi convencional registrou o melhor desempenho quanto ao arrancamento aos 7 e 28 dias de idade, contrariando a hipótese de não aderir às superfícies úmidas. A aderência das argamassas cimentícias aumentou dos três aos sete dias e depois diminuiu, alcançando uma resistência considerada imprópria. Finalmente, para um mesmo traço, a argamassa constituída de agregados de maior granulometria conseguiu melhor desempenho em relação ao desgaste por abrasão, mesmo tendo resistência à compressão menor.

### **2.3.4 Acrílicos e outros sistemas poliméricos**

De acordo com ACI 210 (1987), há três maneiras de se incorporar polímeros no concreto. ACI 210 (1987) e Kormann *et al.* (2001) as definem como concreto impregnado de polímero (CIP), argamassa ou concreto modificado com polímero (CMP) e argamassa ou concreto polimérico (CP).

Devido à sua grande compatibilidade (com os concretos) e versatilidade na aplicação, o CIP é aplicado em pontes, vertedouros, meios-fios, tubulações de saneamento e obras com deteriorações gerais, pois é resistente à ação da água, ácidos e sais. É um concreto de cimento Portland hidratado no qual se impregna um monômero – normalmente o metil metacrilato – para posterior polimerização (*in situ*) (KORMANN *et al.*, 2001). Uma das desvantagens citadas pelos autores é que ele não sana deteriorações anteriores do substrato, como, por exemplo, fissuras não são vedadas com a aplicação do CIP e agentes agressivos podem atuar por meio delas.

A impregnação com polímero acaba endurecendo a superfície do concreto, melhorando a sua resistência à cavitação (SCHRADER, 1978 *apud* ACI 210, 1987) e à abrasão (LIU, 1980 *apud* ACI 210, 1987). A profundidade de penetração do monômero depende, como

qualquer outro material, da porosidade do substrato e do processo de aplicação e pressão adotada quando da aplicação. Além do alto custo, o CIP é perigoso para a saúde humana e deve ser aplicado por um pessoal treinado e especializado, com experiência neste tipo de serviço (DEPUY, 1975 *apud* ACI 210, 1987). ACI 210 (1987) cita o caso da barragem *Dworshak*, onde esse material foi utilizado para combater as erosões por abrasão e cavitação. O CIP foi testado em serviço na barragem de Detroit e demonstrou um excelente desempenho (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1977 *apud* ACI 210, 1987).

A influência do diâmetro máximo característico (DMC) do agregado é mínima em concretos e argamassas impregnados com polímeros. A abrasão destas misturas depende principalmente da absorção da resina ativada e da resistência à compressão das mesmas (SEBÖK; STRÁNĚL, 2004).

Fowler (1990) *apud* Ohama (1997) relata que cerca de 63.000 m<sup>3</sup> de CMP são utilizados nos Estados Unidos. ACI 548 (1986) *apud* Ohama (1997), estimou que a cada ano, nos EUA, cerca de 1,2 milhões de m<sup>2</sup> de tabuleiros de pontes foram recapeados com CMP. Ohama (1997) constata que o uso do CMP é atraente porque a sua tecnologia é similar à dos concretos e argamassas cimentícias.

Segundo Kormann *et al.* (2001), o CMP é conhecido como uma combinação de cimento, agregados e polímeros orgânicos que são dispersos em água. É adicionado ao concreto para conferir-lhe aumento de flexibilidade, de resistência a impactos, melhorar a percolação de água e sais dissolvidos e a aderência ao substrato. O CMP por polimerização de emulsão é o mais adequado. Para restauração de concretos, os mais indicados são o estireno-butadieno e o látex acrílico.

Um exemplo de reparo com o CMP foi a aplicação de um spray de um concreto modificado de látex com adição de fibras na superfície severamente deteriorada da parede de navegação da eclusa da barragem *Lower Monumental* em Washington (SCHRADER, 1983a *apud* ACI 210, 1987).

A argamassa ou concreto polimérico (CP) é um material compósito em que os agregados são unidos junto à matriz com a ajuda de um aglutinante de polímero (KORMANN *et al.*, 2001). É feito com uma variedade de monômeros e resinas; as de poliéster têm custo moderado e grande variedade de formulações; as resinas epóxi são mais caras, mas oferecem a vantagem de aderir muito bem em superfícies úmidas. De acordo com Kormann *et al.*

(2001), “as resinas, em geral, apresentam cura rápida, boas resistências à compressão e flexão, boa adesão, boa durabilidade em gelo/degelo, baixa permeabilidade à água e a agentes agressivos e resistência a ataques químicos”.

ACI 210 (1987) adverte que o CP tem limitações quanto ao seu uso em larga escala como reparo de estruturas hidráulicas pelo custo elevado e recomenda que se verifique a compatibilidade entre os coeficientes de expansão térmica do substrato e do reparo. Ainda, Aguado *et al.* (1996) relatam que os concretos de polímeros são recomendados para o uso como recobrimentos de grandes espessuras e que é importante atentar para as altas temperaturas que podem ser geradas pelo processo exotérmico de polimerização e da retração subsequente, que provoca a fissuração e a perda de aderência.

Como exemplos de aplicações de CP, ACI 210 (1987) afirma que este material está sendo usado como recapeamento de pisos e como elemento pré-moldado para superfícies danificadas (FONTANA; BARTHOLOMEW, 1981; SCANLON, 1981; KUHLMANN, 1981; BHARGAVA, 1981 *apud* ACI, 1987). Testes de campo com CP pré-moldado ocorreram na barragem *Deadwood*, em Idaho e como reparo ao dano de abrasão e cavitação na barragem *American Falls*. Smoak (1985) *apud* ACI 210 (1987) descreveu um reparo realizado com CIP e CP na barragem *Grand Coulee*.

### **2.3.5 Concreto ou argamassa projetada**

Segundo ACI 210 (1987), a argamassa projetada vem sendo utilizada constantemente no reparo de estruturas hidráulicas. Este método permite a aplicação do reparo sem a necessidade de formas, além de ser feito em áreas muito restritas. É um método bastante econômico e garante uma boa produtividade em relação aos demais. Aceita, ainda, a incorporação de fibras para melhorar a aderência e reduzir a reflexão.

### **2.3.6 Pintura**

Tintas a base de poliuretano e neoprene foram ensaiadas à erosão por abrasão e cavitação (HOUGHTON; BERGE; PAXTON, 1978) e ambas demonstraram boa resistência às referidas patologias. O problema das pinturas flexíveis é a colagem com o substrato de concreto, pois, uma pequena falha na colagem pode fazer com que o revestimento de tinta seja completamente descascado (ACI 210, 1987).

Slikkerveer *et al.* (1999) elaboraram um modelo que verifica a resistência de três pinturas de poliuretano em função do ângulo de impacto das partículas e das suas propriedades termomecânicas. Os autores observaram que quanto menor a temperatura de transição vítrea ( $T_v$ ) menor a resistência à abrasão das pinturas. Como conclusão, os pesquisadores sugeriram que os materiais de proteção fossem classificados com base em ensaios de abrasão com ângulo de impacto crítico das partículas em torno de 15°.

Ao estudar o comportamento de diferentes tipos de pintura quanto à abrasão e aos mecanismos de danos, Höppel *et al.* (1999) concluíram que o procedimento de aplicação das tintas termomecânicas pouco influenciava na abrasão e que as suas resistências ao desgaste eram governadas pelas suas propriedades microscópicas.

### **2.3.7 Concreto com o agregado pré-colocado**

O concreto com o agregado pré-colocado é como um concreto bombeado (maior coesão). Porém o que é bombeado é só a argamassa, pois o agregado graúdo já foi previamente colocado. É recomendado para grandes cavidades onde o local seja de difícil acesso (CONCRETE CONSTRUCTIONS PUBLICATIONS, 1982 apud ACI 210, 1987). O agregado graúdo deve estar limpo, bem graduado e com diâmetro máximo entre 12,0 e 38,0 mm, dependendo do tamanho da cavidade. O bombeamento deve ocorrer pela parte de baixo da forma. Para o adensamento correto, aplica-se uma pressão. Esta técnica é utilizada para concretagem submersa e não apresenta grandes novidades.

Segundo Andriolo (1984), a definição da dimensão máxima característica do agregado graúdo depende dos equipamentos de lançamento e adensamento utilizados. A disposição dos agregados graúdos deve ser tal que minimize os vazios entre eles. A areia deve passar na peneira com abertura de malha de 1,2 mm e ter módulo de finura entre 1,5 e 2,0. O proporcionamento destes materiais resume-se, segundo o autor, ao estudo de dosagem da argamassa e a relação cimento:areia situa-se normalmente entre 1:1 e 1:2.

### **3 Metodologia**

Neste capítulo são estabelecidos todos os materiais e procedimentos ou métodos utilizados na pesquisa. A pesquisa foi dividida em três etapas, as quais são detalhadamente descritas a seguir.

#### **3.1 1ª ETAPA – CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE REPARO**

##### **3.1.1 Materiais Cimentícios**

###### **3.1.1.1 Cimento CP I - 32**

O primeiro cimento Portland lançado no mercado brasileiro foi o conhecido CP, correspondendo atualmente ao CP I, um tipo de cimento portland comum sem quaisquer adições além do gesso, para retardar a pega.

O cimento CP I – 32 utilizado nesta pesquisa foi fabricado pela NASSAU, em fábrica localizada no município de Capanema, no estado do Pará, denominada CIBRASA S/A. Este cimento foi escolhido pelo fato de ser, segundo a NBR 5732, o cimento brasileiro mais puro, isto é, com o maior percentual de “clinker” e conseqüentemente com o mínimo de adições minerais. Com o intuito de reproduzir as propriedades do concreto original da UHE de Curuá-Una, produzido na década de 70, tal característica foi levada em consideração, já que os cimentos mais antigos teoricamente não possuíam as incorporações de adições minerais utilizadas hoje nos cimentos compostos atuais como o CP II, por exemplo. Este cimento foi utilizado na produção dos corpos-de-prova do substrato para o ensaio de abrasão.

As características químicas, físicas e mecânicas se encontram nas tabelas Tabela 1, Estes valores foram fornecidos pelo departamento técnico da CIBRASA S/A.



**Tabela 1** – Características químicas, físicas e mecânicas do cimento CP I – 32. (FONTE: CIBRASA – Departamento Técnico).

| DETERMINAÇÃO QUÍMICA                                                           |                                 | OBTIDO (%) |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------|
| Perda ao fogo - NBR NM 18 (Referência $\leq 2,0\%$ )                           |                                 | 1,13%      |
| Resíduo insolúvel - NBR 5744 (Referência $\leq 1,0\%$ )                        |                                 | 0,73%      |
| SiO <sub>2</sub> - NBR 9203                                                    |                                 | 18,65%     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - NBR 9203                                      |                                 | 5,19%      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - NBR 9203                                      |                                 | 2,80%      |
| CaO total - NBR 9203                                                           |                                 | 63,46%     |
| MgO - NBR 9203 (Referência $\leq 6,5\%$ )                                      |                                 | 2,81%      |
| SO <sub>3</sub> - NBR 9203 (Referência $\leq 4,0\%$ )                          |                                 | 2,44%      |
| K <sub>2</sub> O - NBR 5747                                                    |                                 | --         |
| Na <sub>2</sub> O - NBR 5747                                                   |                                 | --         |
| CaO livre - NBR 7227                                                           |                                 | 2,77%      |
| C <sub>3</sub> S                                                               |                                 | 65,05%     |
| C <sub>2</sub> S                                                               |                                 | 2,30%      |
| C <sub>3</sub> A                                                               |                                 | 9,02%      |
| C <sub>4</sub> AF                                                              |                                 | 8,52%      |
| CaSO <sub>4</sub>                                                              |                                 | 4,15%      |
| DETERMINAÇÃO FÍSICA                                                            |                                 | OBTIDO     |
| Ret #200 - NBR 11579/91 (Referência $\leq 12\%$ )                              |                                 | 0,7        |
| Ret #325 - NBR 9202/85 (Referência $\leq 6,0\%$ )                              |                                 | 3,7        |
| Área específica - NBR NM 76/98 (Referência $\geq 2600 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) |                                 | 3994       |
| Massa específica - NBR NM 23/98 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )                     |                                 | 3,08       |
| Consistência normal - NBR 11580/91 (%)                                         |                                 | 29,6       |
| Tempo de Pega - NBR 11581/91 (horas)                                           | Início (Referência $\geq 1,0$ ) | 02:15      |
|                                                                                | Fim (Referência $\leq 10,0$ )   | 03:35      |
| Expansão - NBR 7215 (mm)                                                       | Quente (Referência $\leq 5,0$ ) | 1          |
|                                                                                | Frio (Referência $\leq 5,0$ )   | --         |
| CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)               |                                 |            |
| IDADE (dias)                                                                   |                                 | CP I - 32  |
| 1                                                                              |                                 | 13,4       |
| 3 (Referência $\geq 10,0 \text{ MPa}$ )                                        |                                 | 28,1       |
| 7 (Referência $\geq 20,0 \text{ MPa}$ )                                        |                                 | 37,8       |
| 28 (Referência $\geq 32,0 \text{ MPa}$ )                                       |                                 | 45,1       |

### 3.1.1.2 Cimento CP V – ARI

O cimento portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) embora contemplado pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) em norma a parte à norma referente ao

cimento portland comum, na verdade é um tipo particular deste, que tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é obtido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do “clínquer”, bem como pela moagem mais fina deste “clínquer”, de modo que, ao reagir com a água, este cimento adquira altas resistências já nas primeiras idades, apresentando uma taxa de desenvolvimento de resistência elevada (BT 106, 2002). Por este motivo a sua produção tem custo elevado, o que repercute no seu preço final. Apesar desta vantagem técnica, a aceleração no processo de hidratação das partículas de cimento conduz a um excessivo aumento no calor de hidratação do concreto ou argamassa produzidos com este cimento, fato que não é recomendado quando se produz concreto-massa, tipo de concreto normalmente utilizado em barragens.

Nesta pesquisa, o cimento ARI foi utilizado para a composição de todas as argamassas cimentícias e concretos utilizados como reparos no ensaio de abrasão e no de caracterização das propriedades, bem como na produção das pastas cimentícias usadas como adesivos nos ensaios de abrasão e ponte de aderência e na confecção dos cp's cilíndricos de 10x20 cm usados neste último ensaio.

O cimento ARI utilizado é o cimento CAUÊ produzido pela CAUÊ CIMENTOS, do Grupo Camargo Correa, na fábrica de Ijací. As suas características químicas, físicas e mecânicas foram fornecidas pelo próprio fabricante e encontram-se na Tabela 2.

**Tabela 2** – Características químicas, físicas e mecânicas do CP V – ARI utilizado na pesquisa. (FONTE: CAUÊ CIMENTOS)

| DETERMINAÇÃO QUÍMICA                                    | OBTIDO (%) |
|---------------------------------------------------------|------------|
| Perda ao fogo - NBR NM 18 (Referência $\leq 4,5\%$ )    | 2,46%      |
| Resíduo insolúvel - NBR 5744 (Referência $\leq 1,0\%$ ) | 0,56%      |
| SiO <sub>2</sub> - NBR 9203                             | 19,67%     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - NBR 9203               | 5,01%      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - NBR 9203               | 2,62%      |
| CaO total - NBR 9203                                    | 64,02%     |
| MgO - NBR 9203 (Referência $\leq 6,5\%$ )               | 1,38%      |
| SO <sub>3</sub> - NBR 9203 (Referência $\leq 3,5\%$ )   | 3,11%      |
| K <sub>2</sub> O - NBR 5747                             | 0,84%      |
| Na <sub>2</sub> O - NBR 5747                            | 0,03%      |
| CaO livre - NBR 7227                                    | 1,48%      |
| C <sub>3</sub> S                                        | 64,24%     |
| C <sub>2</sub> S                                        | 7,82%      |
| C <sub>3</sub> A                                        | 7,37%      |
| C <sub>4</sub> AF                                       | 9,10%      |
| CaSO <sub>4</sub>                                       | --         |

(continua)

| DETERMINAÇÃO FÍSICA                                                            |                                 | OBTIDO |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------|
| Ret #200 - NBR 11579/91 (Referência $\leq 6,0\%$ )                             |                                 | --     |
| Ret #325 - NBR 9202/85 (Referência $\leq 6,0\%$ )                              |                                 | 0,9    |
| Área específica - NBR NM 76/98 (Referência $\geq 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) |                                 | 4894   |
| Massa específica - NBR NM 23/98 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )                     |                                 | --     |
| Consistência normal - NBR 11580/91 (%)                                         |                                 | --     |
| Tempo de Pega - NBR 11581/91 (horas)                                           | Início (Referência $\geq 1,0$ ) | 3:05   |
|                                                                                | Fim (Referência $\leq 12,0$ )   | 4:05   |
| Expansão - NBR 7215 (mm)                                                       | Quente (Referência $\leq 5,0$ ) | --     |
|                                                                                | Frio (Referência $\leq 5,0$ )   | --     |
| CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)               |                                 |        |
| IDADE (dias)                                                                   | CP V - ARI                      |        |
| 1 (Referência $\geq 14,0 \text{ MPa}$ )                                        | 29,7                            |        |
| 3 (Referência $\geq 24,0 \text{ MPa}$ )                                        | 42,2                            |        |
| 7 (Referência $\geq 34,0 \text{ MPa}$ )                                        | 47,9                            |        |
| 28                                                                             | 54,6                            |        |

### 3.1.2 Agregados

Com relação aos agregados, optou-se pela utilização dos que apresentam maior disponibilidade para aquisição, isto é, o seixo rolado e a areia quartzosa como agregados graúdo e miúdo, respectivamente. O uso da brita granítica da região de Tracuateua – PA foi descartado justamente pela dificuldade de aquisição deste material e por seu alto custo de aquisição. Os agregados aqui relacionados serão utilizados na produção dos concretos de referência e dos materiais de reparo do ensaio de abrasão prescrito pela ASTM C1138/97.

Para o concreto do substrato do ensaio de ponte de aderência, foi utilizada uma brita calcárea limpa, de forma equidimensional.

#### 3.1.2.1 Agregado graúdo

Os agregados naturais encontrados no mercado da Construção Civil em Belém são procedentes da região Nordeste do Estado do Pará, onde, praticamente, não há disponibilidade

de agregados de boa qualidade para produção de concreto. Constituem-se de seixos extraídos de jazidas de solo arenoso ou areno-argiloso, com partículas friáveis e/ou a presença de elevados teores de material pulverulento (argila e silte).

A utilização de pedra britada de granito, recomendada para a produção de CAD, tem seu uso bastante restrito na capital por causa do elevado custo de aquisição em relação a outros agregados disponíveis na região e também pelo fato da jazida se localizar a mais de 200 km de Belém, no município de Tracuateua.

O agregado gráudo utilizado na pesquisa foi o seixo de cava, proveniente do município de Ourém, distante da capital aproximadamente 150 km (via rodoviária). SILVA *et al* (1994) relatam que esse tipo de seixo, do ponto de vista mineralógico, consiste de um conglomerado com predominância de quartzo e chert, inserido numa matriz de solo arenoso. A forma de suas partículas varia de esférica a aproximadamente esférica e, dependendo do ponto de extração, pode ser angulosa.

O seixo empregado na pesquisa foi seco ao ar e empregado da maneira como é encontrado comercialmente: lavado e peneirado. Algumas características do agregado são apresentadas na Tabela 3, na qual se verifica que o agregado tem o diâmetro máximo característico (DMC) de 19 mm e apresenta uma granulometria contínua com grande quantidade de material passante na peneira 4,8 mm, cerca de 19%. O teor de material pulverulento ( $\phi < 75\mu\text{m}$ ) é de aproximadamente 1%, podendo apresentar valores superiores.

**Tabela 3** – Características do seixo de Ourém utilizado nos concretos de reparo.

| DETERMINAÇÕES                 | VALORES OBTIDOS               |                             |           | MÉTODO DE ENSAIO |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------|------------------|
| Composição Granulométrica     | Abertura da peneira ABNT (mm) | Porcentagem retida em massa |           | NBR NM 248       |
|                               |                               | Individual                  | Acumulada |                  |
|                               | 25,0                          | 0                           | 0         |                  |
|                               | 19,0                          | 1,7                         | 1,7       |                  |
|                               | 12,5                          | 27,7                        | 29,4      |                  |
|                               | 9,5                           | 21,3                        | 50,7      |                  |
|                               | 4,8                           | 30,7                        | 81,4      |                  |
|                               | 2,4                           | 11,9                        | 93,3      |                  |
|                               | 1,2                           | 3,6                         | 96,9      |                  |
|                               | 0,6                           | 1,8                         | 98,7      |                  |
|                               | 0,3                           | 0,7                         | 99,4      |                  |
|                               | 0,15                          | 0,4                         | 99,8      |                  |
|                               | < 0,15                        | 0,4                         | 100       |                  |
| Teor de material pulverulento | 0,8%                          |                             |           | NBR NM 46        |
| DMC                           | 19 mm                         |                             |           | NBR NM           |

|                       |                         |            |
|-----------------------|-------------------------|------------|
|                       |                         | 248        |
| Massa específica seca | 2,63 kg/dm <sup>3</sup> | NBR NM 52  |
| Absorção              | 2,3%                    | NBR NM 52  |
| Abrasão “Los Angeles” | 61%                     | NBR NM 515 |

A elevada porcentagem de areia e de partículas finas é atribuída à lavagem ineficiente e à baixa resistência do seixo, que se desgasta no transporte, manuseio e durante a mistura. A NBR 7211 (2005) estipula que a abrasão “Los Angeles” de um agregado não deve ser superior a 50%. Para o CAD esse limite é bem inferior. Alguns pesquisadores sugerem valores iguais ou inferiores a 15% (GUTIÉRREZ e CÁNOVAS, 1996). Entretanto, o seixo estudado apresentou um índice de abrasão de 61%, valor substancialmente superior ao indicado pela norma e pelos pesquisadores. A baixa resistência à abrasão afeta sensivelmente a trabalhabilidade da mistura, uma vez que a sua trituração modifica a distribuição granulométrica e a área específica das partículas, aumentando a demanda de água para a mesma consistência. Além disso, para os concretos estudados, a resistência à abrasão do agregado gráudo foi, como será apresentado adiante, de extrema importância para a abrasão do respectivo concreto.

Outra propriedade do agregado que afeta a consistência das misturas de concreto é a absorção. O seixo estudado apresenta uma absorção de 2,3%, valor relativamente elevado quando comparado com a de outros agregados normalmente empregados na produção de CAD (1%). Essas características dificultam a obtenção de misturas com relações água/cimento reduzidas, a menos que sejam empregados aditivos redutores de água, fato que eleva substancialmente o custo da mistura na região.

Em virtude destes problemas, e conforme a necessidade de concretagem em espaços reduzidos, decidiu-se utilizar os agregados com diâmetro máximo de 9,5 mm, lavando e peneirando o agregado na peneira de abertura de malha quadrada de 2,4 mm, para retirada de materiais pulverulentos. A figura 10 ilustra as condições dos seixos antes e depois deste procedimento.



**figura 10** – Seixo utilizado e passante na peneira de abertura de malha quadrada de 9,5 mm antes do processo de lavagem (à esquerda) e após o processo de lavagem (à direita) (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

A Tabela 4 a seguir, demonstra a distribuição granulométrica do agregado gráudo utilizado nos concretos do reparo, após o tratamento acima mencionado.

**Tabela 4** – Características do agregado gráudo lavado e peneirado.

| DETERMINAÇÕES                 | VALORES OBTIDOS               |                             |           | MÉTODO DE ENSAIO |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------|------------------|
| Composição Granulométrica     | Abertura da peneira ABNT (mm) | Porcentagem retida em massa |           | NBR NM 248       |
|                               |                               | Individual                  | Acumulada |                  |
|                               | 25,0                          | 0,00                        | 0,00      |                  |
|                               | 19,0                          | 0,00                        | 0,00      |                  |
|                               | 12,5                          | 0,00                        | 0,00      |                  |
|                               | 9,5                           | 4,43                        | 4,43      |                  |
|                               | 4,8                           | 6,90                        | 11,33     |                  |
|                               | 2,4                           | 60,59                       | 71,92     |                  |
|                               | 1,2                           | 25,12                       | 97,04     |                  |
|                               | 0,6                           | 2,83                        | 99,88     |                  |
|                               | 0,3                           | 0,12                        | 100       |                  |
|                               | 0,15                          | 0,00                        | 100       |                  |
|                               | < 0,15                        | 0,00                        | 100       |                  |
| Teor de material pulverulento | 0,1%                          |                             |           | NBR NM 46        |
| DMC                           | 9,5 mm                        |                             |           | NBR NM 248       |
| Massa específica seca         | 2,63 kg/dm <sup>3</sup>       |                             |           | NBR NM 52        |
| Absorção                      | 0,5%                          |                             |           | NBR NM 52        |
| Abrasão “Los Angeles”         | 58%                           |                             |           | NBR NM 51        |

Assim, após o tratamento do agregado, através de lavagem e peneiramento, pôde-se constatar que o teor de material pulverulento reduziu bastante, de 0,8 a 0,1%, a absorção passou de 2,3%, valor considerado muito alto, conforme mencionado anteriormente, para 0,5%, sendo este um valor considerado excelente para agregados para concreto. Isto pode ser explicado pela retirada de grande quantidade de finos presentes no seixo antes do tratamento. Credita-se a pequena redução dos valores obtidos no ensaio de Abrasão “Los Angeles” à possível existência de fratura internas aos agregados de maior tamanho (12,5 mm e 19,0 mm). Tais fraturas não ocorreriam em agregados de menor diâmetro (abaixo de 9,5 mm). A figura 11 mostra a seqüência do processo de tratamento do agregado graúdo, que, após o tratamento, foi lavado e peneirado, seco ao ar, em ambiente abrigado das intempéries.



**figura 11** – Agregado graúdo lavado e peneirado, secando ao ar, abrigado de intempéries (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

### **3.1.2.2 Agregado miúdo**

O agregado miúdo normalmente empregado em Belém é extremamente fino e proveniente de jazidas de areia quartzosa, localizadas dentro de um raio de aproximadamente 80 km de Belém. Essa região compreende os municípios de Castanhal, Vigia, Santo Antônio do Tauá e os distritos de Americano, Santa Bárbara, Mosqueiro e Vila do Apeú. A areia utilizada nessa pesquisa é oriunda da região do Apeú, cuja distância da jazida à Belém é de 69 km. Algumas características dessa areia são mostradas na Tabela 5.

**Tabela 5** – Características da areia utilizada.

| DETERMINAÇÕES             | VALORES OBTIDOS         |                               |           | MÉTODO DE ENSAIO |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------|------------------|
| Composição Granulométrica | Abertura da peneira     | Porcentagem retida (em massa) |           | NBR NM 248       |
|                           | ABNT (mm)               | Individual                    | Acumulada |                  |
|                           | 4,8                     | 0,3                           | 0,3       |                  |
|                           | 2,4                     | 0,7                           | 1,0       |                  |
|                           | 1,2                     | 6,9                           | 7,9       |                  |
|                           | 0,6                     | 11,3                          | 19,2      |                  |
|                           | 0,3                     | 45,3                          | 64,5      |                  |
| DMC                       | 0,15                    | 24,0                          | 88,5      | NBR NM 248       |
|                           | < 0,15                  | 11,6                          | 100       |                  |
| DMC                       | 2,4 mm                  |                               |           | NBR NM 248       |
| Módulo de finura          | 1,80                    |                               |           | NBR NM 248       |
| Massa específica          | 2,63 kg/dm <sup>3</sup> |                               |           | NBR NM 52        |

Como se pode perceber, a areia estudada é muito fina, de acordo com a NBR 7211, com grande parte dos seus grãos contidos nas peneiras com menor abertura de malha. O diâmetro máximo característico, o módulo de finura e a massa específica obtidos estão de acordo com o comumente encontrado nas areias da região. Em geral, a variação das características dessas areias é pequena, independente da jazida, bastando que sejam tomadas as devidas providências quanto à sua qualidade como agregado para produção de concretos (NBR 7221/1987 – Ensaio de qualidade da areia – Método de Ensaio e NBR 7211/2005 – Agregados para concreto – Especificação).

Este agregado foi utilizado em todos os concretos e argamassas utilizados na pesquisa.

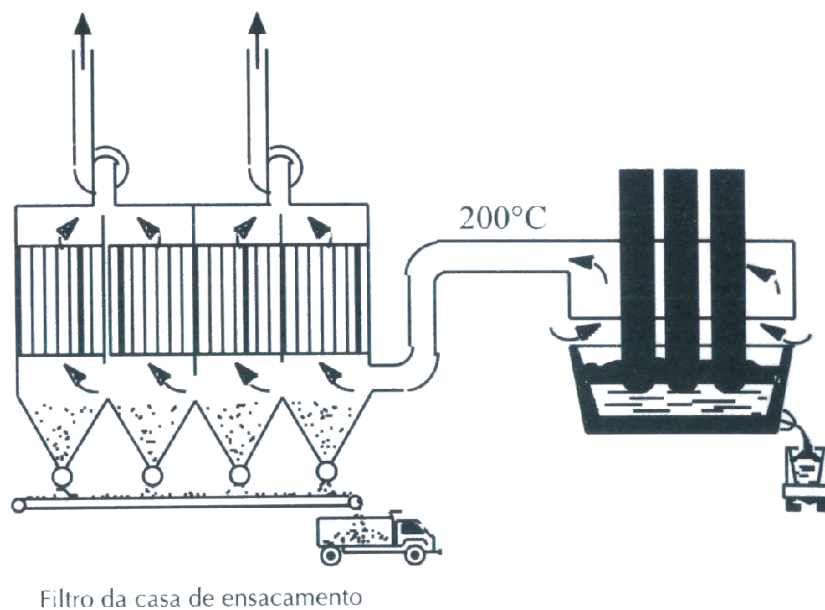
### 3.1.3 Adições Minerais

Nesta pesquisa serão utilizadas duas adições minerais de alta atividade pozolânica: a sílica ativa e o metacaulim. A incorporação destas adições minerais é sugerida por inúmeros pesquisadores e profissionais do meio técnico-científico internacional em razão de proporcionarem melhores propriedades ao concreto tanto no estado fresco quanto endurecido. Com a reação destes materiais com os produtos de hidratação do cimento Portland (efeito pozolânico) e com um melhor preenchimento físico dos vazios devido à sua granulometria (efeito filler), espera-se que ambos os materiais consigam melhorar o desempenho dos concretos frente aos problemas de erosão aos quais serão submetidos. Cabe ressaltar que além de tais vantagens obtidas no estado endurecido, a aplicação de concretos e argamassas no estado fresco com adição dessas pozolanas é facilitada porque estas lhes conferem tixotropia.



### 3.1.3.1 *Sílica ativa*

A sílica ativa é um subproduto de fornos a arco e de indução das indústrias de silício metálico e ligas ferro-silício (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Ao ser aquecido a aproximadamente 2000°C (redução da sílica), produz-se um subóxido de silício, o SiO, que resfria, condensa e depois oxida em forma da sílica SiO<sub>2</sub> (AÏTCIN, 2000). A figura 12 mostra um esquema da coleta da sílica por meio da câmara de filtros mangas.

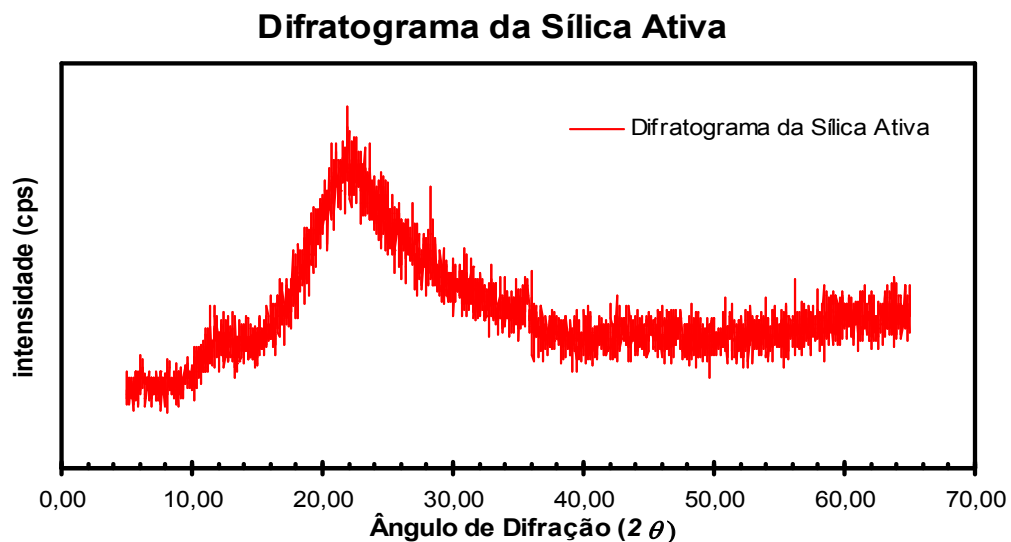


**figura 12** – Recuperação da sílica ativa. (FONTE: AÏTCIN, 2000)

A sílica ativa a ser utilizada na pesquisa é a distribuída pela CAMARGO CORRÊA CIMENTOS, denominada SILMIX, oriunda da fabricação em forno elétrico do silício metálico, onde a fábrica é localizada no município de Tucuruí (PA). As características físicas e a análise química da sílica ativa constam na Tabela 6. A figura 13 apresenta o difratograma de raio-x da sílica ativa estudada.

**Tabela 6** – Características físicas e químicas da sílica ativa utilizada.

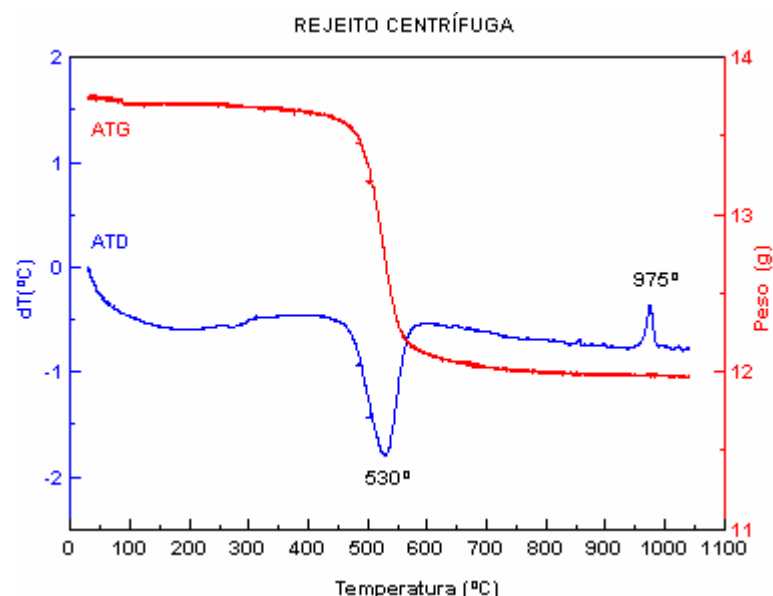
| Características | Determinações                                      | Valores obtidos         |
|-----------------|----------------------------------------------------|-------------------------|
| Químicas        | Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )               | 91,00%                  |
|                 | Óxido de alumínio(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 0,10%                   |
|                 | Óxido de ferro(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )    | 0,70%                   |
|                 | Óxido de Cálcio(CaO)                               | 1,10%                   |
|                 | Óxido de Magnésio(MgO)                             | 1,50%                   |
|                 | Óxido de Sódio(Na <sub>2</sub> O)                  | 0,39%                   |
|                 | Óxido de Potássio(K <sub>2</sub> O)                | 0,44%                   |
|                 | Óxido de Fósforo(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )   | 0,1%                    |
|                 | C (total)                                          | 0,50%                   |
|                 | Perda ao fogo                                      | 1,5 %                   |
|                 | Total                                              | 97,33 %                 |
| Físicas         | Massa específica                                   | 2,20 kg/dm <sup>3</sup> |
|                 | Área superficial específica                        | 13,86m <sup>2</sup> /g  |
|                 | Diâmetro médio das partículas                      | 0,5µm                   |

**figura 13** – Difratogrametria da sílica ativa (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

### 3.1.3.2 Metacaulim

O metacaulim utilizado provém da calcinação e moagem do resíduo do beneficiamento da CADAM, empresa beneficiadora de caulim para cobertura de papéis no estado do Pará. O resíduo utilizado é proveniente da etapa de centrifugação.

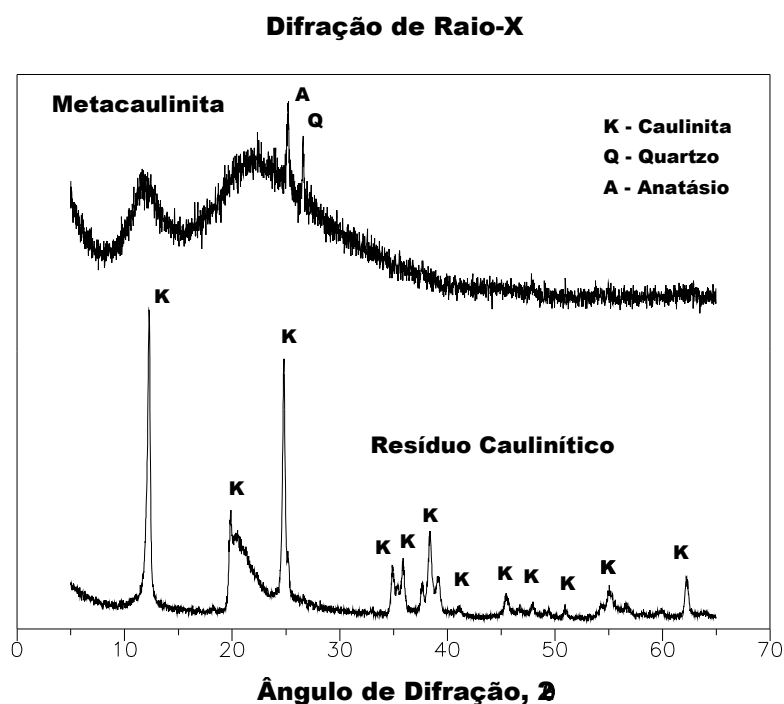
As análises termogravimétricas e termodiferencial do resíduo “in natura” são mostradas na figura 14 são mostrados os difratogramas do resíduo “in natura” e da metacaulinita produzida da calcinação do resíduo a 850°C e moído.



**figura 14** – Termograma do rejeito da centrífuga (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

O termograma (figura 14) indica que o resíduo é constituído basicamente por caulinita. Fato que fica evidenciado por duas reações: uma endotérmica referente à desidroxilação da caulinita entre 450 e 600°C, originando um material estruturalmente desarranjado denominado metacaulinita; e a outra correspondente à nucleação da mulita a partir da metacaulinita pré-existente (entre 975 e 985°C). O valor de perda de massa do resíduo, em torno de 14%, calculado a partir das curvas termogravimétricas, está muito próximo do valor teórico da caulinita – 13,94% - o que também indica a predominância deste argilomineral no resíduo.

Os espectros de raio-x (Figura 15) confirmam os resultados do termograma, indicando que o resíduo é constituído por uma caulínica mal cristalizada, o que fica caracterizado pela presença de apenas uma raia de difração no intervalo  $2\theta$  de 20 a 22°. Com relação ao material calcinado, o caráter eminentemente amorfo e a ausência de raias de difração correspondentes à caulinita indicam o elevado grau de desidroxilação desta pozolana. Foram também detectados picos referentes ao anatásio e ao quartzo em proporções ínfimas (fases pozolanicamente inertes).



**Figura 15** – Difrátogramas de Raio-x do Resíduo Caulinitico “in natura” e da Metacaulinita (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

Esta constituição mineralógica do resíduo é um aspecto positivo sob o ponto de vista da produção de pozolanas, uma vez que as argilas cauliniticas são aquelas mais propícias à fabricação de pozolanas, sendo que as mal cristalizadas apresentam uma taxa de desidroxilação e uma atividade pozolânica ligeiramente superior em relação às bem cristalizadas (ZAMPIERI, 1989; 1993).

A composição química do resíduo é mostrada na Tabela 12. Os resultados químicos confirmam as análises mineralógicas, em que o resíduo é constituído basicamente por caulinita (fase pozolanicamente ativa). Este fato pode ser constatado pela relação média  $Al_2O_3/SiO_2$  do resíduo ser 0,85 - percentual igual ao do valor teórico da cela unitária da caulinita (GRIM, 1963). Os teores de quartzo (sílica livre), na ordem de 0,20% sobre a massa do material “in natura”, são desprezíveis e não comprometem a reatividade pozolânica dos resíduos quando calcinados. De acordo com Ambroise *et al* (1985a, 1985b), somente teores de quartzo e mica acima de 10% (sobre a massa total do material calcinado) é que prejudicam de modo significativo as propriedades pozolânicas do material.

Os teores de ferro e titânio, na ordem de 4%, são responsáveis pela coloração róseo-claro dos resíduos, que ao serem calcinados em atmosfera oxidante tendem a apresentar uma

coloração um pouco mais escura. O teor de álcalis do resíduo é extremamente reduzido, em torno de 0,03 a 0,50, dependendo do procedimento de análise química.

**Tabela 7** – Análises químicas das amostras do resíduo da centrífuga.

| ÓXIDOS ANALISADOS (%)                              | RESÍDUO CENTRÍFUGA    |
|----------------------------------------------------|-----------------------|
|                                                    | FLUORESCÊNCIA RAIOS-X |
| SiO <sub>2</sub>                                   | 43,8                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | 36,8                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                     | 2,70                  |
| TiO <sub>2</sub>                                   | 2,0                   |
| Na <sub>2</sub> O                                  | < 0,06                |
| K <sub>2</sub> O                                   | 0,11                  |
| CaO                                                | < 0,05                |
| MgO                                                | < 0,10                |
| MnO                                                | < 0,01                |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                      | 0,22                  |
| P. F.                                              | 13,66                 |
| SiO <sub>2</sub> livre                             |                       |
| SiO <sub>2</sub> (reativo)                         | 44,41                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> * | 0,85                  |

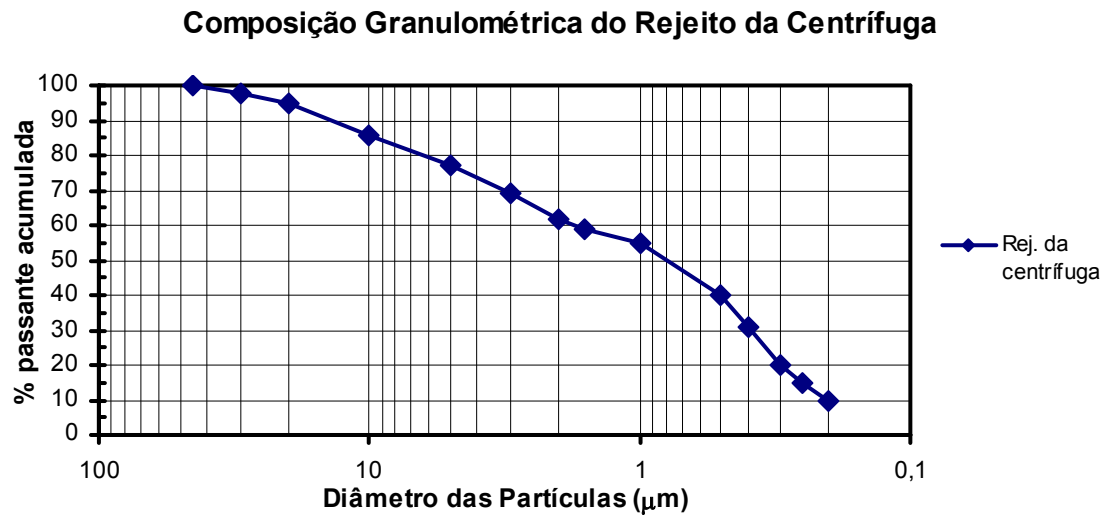
\* Para efeito de cálculo utilizou-se o SiO<sub>2</sub> potencialmente reativo (SiO<sub>2</sub> – SiO<sub>2</sub> livre).

A Tabela 8 mostra as determinações das características físicas avaliadas. De acordo com os resultados o valor reduzido de massa específica, na ordem de 2,60g/cm<sup>3</sup>, indica que o resíduo é uma argila rica em argilominerais e com baixos teores de outros minerais secundários como, por exemplo, quartzo, muscovita, anatásio e óxidos de ferro, ratificando os resultados encontrados nas análises química e mineralógica.

**Tabela 8** – Características físicas do resíduo da centrífuga.

| DETERMINAÇÕES                                   | RESÍDUO CENTRÍFUGA |
|-------------------------------------------------|--------------------|
| Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )           | 2,60               |
| Área Superficial Específica (m <sup>2</sup> /g) | 13,91              |
| Diâmetro médio das partículas (µm)              | 0,72               |

Na Figura 16 se apresenta a curva granulométrica do resíduo da centrífuga, em função do diâmetro das partículas. O resíduo é uma argila caulinítica extremamente fina, com diâmetros médios entre 0,5 e 0,8µm e área superficial específica bastante elevada, na ordem de 15 a 17m<sup>2</sup>/g. Estas características qualificam o resíduo como matéria-prima excelente para a produção de uma pozolana extremamente reativa denominada metacaulim de alta reatividade (MCAR).



**Figura 16** – Curva de distribuição granulométrica do metacaulim proveniente do resíduo da centrifuga (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

Em resumo, a Tabela 9 apresenta as propriedades do material.

**Tabela 9** – Resumo das propriedades do Metacaulim utilizado.

| Características | Determinações                                      | Valores obtidos         | Valores teóricos da cela unitária da caulinita (GRIM, 1963) |
|-----------------|----------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Químicas        | Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )               | 43.80%                  | 46.54%                                                      |
|                 | Óxido de alumínio(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 36.80%                  | 39.50%                                                      |
|                 | Óxido de ferro(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )    | 2.70%                   |                                                             |
|                 | Óxido de Cálcio(CaO)                               | < 0.05%                 |                                                             |
|                 | Óxido de Magnésio(MgO)                             | < 0.10%                 |                                                             |
|                 | Óxido de Titânio(TiO <sub>2</sub> )                | 2.00%                   |                                                             |
|                 | Óxido de Sódio(Na <sub>2</sub> O)                  | 0.06%                   |                                                             |
|                 | Óxido de Potássio(K <sub>2</sub> O)                | 0.11%                   |                                                             |
|                 | Enxofre Total(S)                                   | 0.03%                   |                                                             |
|                 | Perda ao fogo Total                                | 13.66%                  |                                                             |
|                 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub>  | 0.85                    | 0.85                                                        |
| Físicas         | Massa específica                                   | 2.60 kg/dm <sup>3</sup> |                                                             |
|                 | Área superficial específica                        | 13.91m <sup>2</sup> /g  |                                                             |
|                 | Diâmetro médio das partículas                      | 0.72µm                  |                                                             |

### 3.1.4 Argamassa epóxi

Segundo o seu fabricante, a argamassa utilizada na pesquisa é uma argamassa epoxídica de três componentes tipo pastosa, aplicada com espátula, de alta resistência à abrasão e impacto. Em diversas situações não requer primer ou pintura de selamento. É recomendável que seja aplicado em apenas uma camada de 4,0 mm de espessura máxima, podendo ser aplicado em mais de uma camada de 4,0 mm, porém com queda de desempenho mais

acentuada quanto maior for a espessura total da camada. Esta argamassa apresenta uma rápida liberação para uso se comparada a outras argamassas epóxi, fator interessante no caso de usinas hidrelétricas. É utilizada como argamassa de reparo, apoio de pontes e reparo de juntas, porém alcança melhores desempenhos quando abrigada de intempéries. Ela foi utilizada como argamassa de reparo no ensaio de abrasão ASTM C1138/97.

Possui como componentes um líquido viscoso, a resina (A), um líquido de baixa viscosidade de cor âmbar (B) e uma mistura de areias silicosas de granulometria fina (C). Recomenda-se misturar os três componentes adicionando os componentes “B” e “C” ao componente “A” e homogeneizar. A aplicação deve ser efetuada com uma desempenadeira e logo após proceder ao deslizamento do rolo de lã na superfície para acabamento e fechamento dos poros. O substrato deve estar preparado, rugoso, limpo e seco.

Possui rendimento de 10,0 Kg/m<sup>2</sup> aproximadamente para aplicação de camada com 4,0 mm de espessura, o seu tempo de manuseio é de 40 minutos à temperatura de 20 °C, sua resistência à compressão axial é de aproximadamente 36 MPa aos 7 dias. Quanto à sua resistência de aderência, o fabricante atesta que, aos 7 dias, seja de 19 MPa.

### **3.1.5 Elaboração de Diversos Tipos de Argamassas e Concretos e Avaliação de suas Consistências**

As argamassas de reparo de base cimentícia utilizadas foram produzidas no Laboratório de Engenharia Civil da UFPa, em uma argamassadeira elétrica de duas velocidades; a de base epóxi foi produzida de acordo com as recomendações do fabricante, misturando manualmente as partes em sua totalidade, pois tal material é vendido pré-dosado, bastando apenas misturar os seus três componentes. Os concretos foram todos produzidos em betoneira de eixo variável (entre horizontal e inclinado) com capacidade de 320 litros.

Para o ensaio de Determinação do Índice de Consistência pela Mesa de Queda, realizaram-se os seguintes procedimentos:

Após a preparação das argamassas, posicionou-se o tronco-cônico no centro da mesa de queda, levemente lubrificada com óleo;

Com auxílio de espátula, moldaram-se as argamassas no tronco-cônico imóvel em três camadas com 15, 10 e 5 golpes de soquete normal, nas 1ª, 2ª e 3ª camadas, respectivamente, removendo o excesso na última camada e regularizando o topo do tronco;

Retirou-se a fôrma tronco-cônica verticalmente, com bastante cuidado. Em seguida, promoveram-se 30 quedas sucessivas da mesa de consistência em, aproximadamente, 30 segundos;

Anotaram-se, com o uso do paquímetro, duas medidas ortogonais nas argamassas espalhadas pelas 30 quedas e calcularam-se as respectivas médias aritméticas delas.

Estes procedimentos seguem a norma NBR 7215 (ABNT, 1996).

Foram produzidos quatro tipos de argamassas para a realização dessa etapa. Os procedimentos de moldagem, cura, determinação da consistência foram os mesmos para todos os tipos destes materiais.

As argamassas produzidas foram:

- Argamassa cimentícia de **referência**, sem adição de qualquer pozolana, porém com adição de aditivo superplastificante de 3ª geração, a base de poliacrilatos (AAD 0%);
- Argamassa cimentícia com adição de 10% da pozolana **metacaulim** (AAD M10%), em peso, com as mesmas características de dosagem da argamassa de referência, inclusive com igual teor de superplastificante;
- Argamassa cimentícia com adição, em peso, da pozolana **sílica ativa** em 10% (AAD S10%);. Esta argamassa é similar à com adição de metacaulim;
- Argamassa **epóxi** tricomponente (AE), pré-dosada pelo fabricante, com nome comercial.

A Tabela 10 resume estes materiais, apresentando, ainda suas respectivas dosagens em massa.



**Tabela 10** – Argamassas utilizadas nesta etapa e suas dosagens, em massa.

| ARGAMASSAS                     | ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS (cimento : areia : a/c : [aditivo superplastificante : pozolana]) [ambos % da massa de aglomerante] |                         |                       | ARGAMASSA EPÓXI (AE)    |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
|                                | REFERÊNCIA (AAD 0%)                                                                                                        | SÍLICA ATIVA (AAD S10%) | METACAULIM (AAD M10%) |                         |
| Dosagem em massa               | 1:2:0,32:1,0%:0%                                                                                                           | 1:2:0,32:1,0%:10%       | 1:2:0,32:1,0%:10%     | Proporção do fabricante |
| Consumo de aglomerante (kg/m³) | 708,0                                                                                                                      | 706,0                   | 712,0                 | --                      |

Para a medida de consistência dos concretos, utilizou-se o método do abatimento do tronco de cone (*slump*), através da norma NBR NM 67/98. Foi estipulado o valor de  $220 \pm 20$  mm como suficiente para uma adequada aplicação e adensamento dos concretos por meio do seu próprio peso, auxiliado com golpes na superfície das fôrmas.

Os concretos de alto desempenho produzidos foram:

- Concreto de **referência**, sem adição de qualquer pozolana, porém com adição de aditivo superplastificante de 3ª geração, a base de poliacrilatos (CAD 0%);
- Concreto com adição de 10% da pozolana **metacaulim** (CAD M10%), em peso, com dosagem similar à do concreto de referência, inclusive com igual teor de superplastificante;
- Concreto com adição, em peso, da pozolana **sílica ativa** em 10% (CAD S10%);. Este concreto é semelhante ao com adição de metacaulim;

A Tabela 11 apresenta a dosagem destes concretos:

**Tabela 11** – Concretos utilizados na pesquisa e suas dosagens, em massa.

| CONCRETO                       | CAD's (cimento : areia : seixo : a/c : [aditivo superplastificante : pozolana]) [ambos % da massa de aglomerante] |                                      |                                      |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|                                | REFERÊNCIA (CAD 0%)                                                                                               | SÍLICA ATIVA (CAD S10%)              | METACAULIM (CAD M10%)                |
| Dosagem em massa               | 1 : 0,93 : 2,07 : 0,32 : 0,95% : 0%                                                                               | 1 : 0,93 : 2,07 : 0,32 : 0,95% : 10% | 1 : 0,93 : 2,07 : 0,32 : 0,95% : 10% |
| Consumo de aglomerante (kg/m³) | 556,0                                                                                                             | 556,0                                | 556,0                                |

### 3.1.6 Avaliação da Resistência Mecânica das Argamassas e Concretos de Reparo para as Idades de 3, 7 e 28 Dias e do Concreto do Substrato aos 28 Dias

As argamassas e concretos são os mesmos citados no item anterior.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial nas argamassas, com cp's cilíndricos de 5x10 cm (diâmetro x altura), e nos concretos, com cp's cilíndricos de 10x20 cm (diâmetro x altura).

A moldagem dos corpos-de-prova de argamassa foi realizada de acordo com a norma NBR 7215 (ABNT, 1996) e a moldagem dos cp's de concreto foi realizada com vibrador de imersão seguido de acabamento da superfície dos cp's com o auxílio de espátula. Os moldes de ambos os materiais – argamassas e concretos – foram untados com óleo para facilitar a desmoldagem.

Passadas as horas iniciais de cura das argamassas e dos concretos, os corpos-de-prova foram desmoldados e colocados em câmara úmida até momentos antes do ensaio. Os cp's eram retirados da câmara úmida por, no mínimo, seis horas antes dos ensaios e então eram procedidos os testes de compressão axial. Para os ensaios de argamassas, foi utilizado um dispositivo especial para adaptação do prato do êmbolo às dimensões reduzidas dos cp's de 5x10 cm.

Os procedimentos seguiram as normas NBR 7215 (ABNT, 1996) e NBR 5738 (ABNT, 2006).

## 3.2 2ª ETAPA – ENSAIO DE PONTE DE ADERÊNCIA

Foram produzidas sete pastas, ou produtos que atuam como pontes de aderência, isto é, adesivos para promover adesão entre concretos. Estes materiais encontram-se listados abaixo:

- Pasta cimentícia de **referência**, sem adição de qualquer pozolana, mas com adição de aditivo superplastificante de 3ª geração, a base de poliacrilato;
- Pasta cimentícia análoga à de referência, com substituição de 10%, em peso, da massa de cimento por **metacaulim de alta reatividade** (MCAR);
- Idêntica à de MCAR, porém com substituição do metacaulim por **silica ativa**;

- Adesivo estrutural de base **epóxi**, para colagem de materiais com a superfície **úmida**;
- Adesivo estrutural de base **epóxi**, para colagem de materiais com a superfície **seca**;
- *Primer* de base **epóxi**, para colagem de materiais com a superfície **úmida**;
- Adesivo estrutural de resina **acrílica**, para colagem de materiais com a superfície **úmida**;

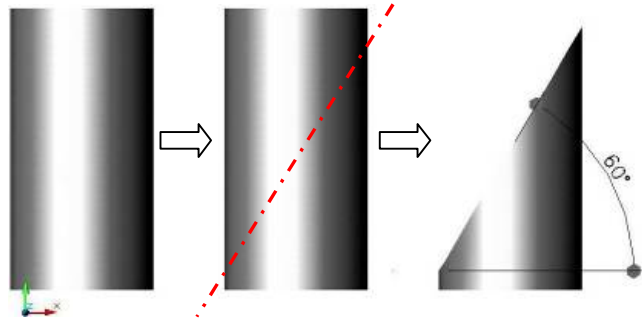
Para avaliar a possibilidade de aplicação de cada reparo em superfícies úmidas de concreto, foi proposto um ensaio de aderência entre concreto fresco e concreto endurecido colados com diversos materiais denominados de *adesivos*, em um ensaio conhecido como “ponte de aderência” ou “compressão-cisalhamento na junta diagonal” ou ainda, “*slant shear test*”.

O ensaio da avaliação das pontes de aderência teve início com a produção de corpos-de-prova (cp's) cilíndricos de concreto do substrato com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, moldados de acordo com a NBR 5738/2003 – Moldagem e cura dos corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. A resistência de projeto do concreto do substrato era de cerca de 50 MPa aos 3 dias de idade, de modo que se pudessem avaliar as pontes de aderência até uma resistência considerada satisfatória (50 MPa) às primeiras idades (3 dias). Os valores de resistência à compressão axial alcançados por este concreto se encontram no APÊNDICE A.

Os espécimes foram cortados através de serra diamantada em um ângulo de **60°** com a horizontal, de acordo com a figura 17. Para evitar que os cp's de concreto do substrato apresentassem fissuras e microfissuras em demasia, decorrentes da agressão causada pelo corte, determinou-se que os espécimes seriam cortados somente ao atingirem a idade mínima de 7 dias, mesmo esses concretos apresentando altas resistências aos 3 dias.

Em seguida, os corpos-de-prova tiveram a superfície de contacto (plano inclinado) apicoada manualmente com ponteira ou talhadeira, de forma que a superfície de contacto apresentasse a forma ilustrada na figura 18; Os cp's foram saturados por 72 horas, no mínimo. Minutos antes da aplicação dos adesivos, foi realizada, com água, escova de aço e esponja, a limpeza do material solto e de quaisquer impurezas que poderiam vir a prejudicar a aderência.

As superfícies inclinadas dos cp's eram rapidamente imersas em água à temperatura ambiente logo antes da aplicação dos adesivos. Com as superfícies dos cp's encharcadas, promoveu-se a aplicação dos adesivos no plano inclinado, colocando-os, em seguida, dentro das fôrmas cilíndricas (figura 19) e, imediatamente após isto, com os adesivos componentes da ponte no estado fresco, ou pegajoso, foi aplicado um concreto similar ao do substrato.



**figura 17** – Sequência de preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de ponte de aderência. Vista Lateral (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).



**figura 18** – Aspecto da superfície dos cp's após apicoamento e limpeza da superfície diagonal (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).



**figura 19** – Cp na fôrma, após a aplicação do adesivo, prestes a ser complementado com concreto de alta resistência (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

Após 24 horas de preenchimento do concreto do substrato, os cp's eram desmoldados e submetidos à cura por imersão em água à temperatura ambiente, onde permaneciam até a véspera dos dias dos seus respectivos ensaios à compressão. Os cp's foram ensaiados de acordo com a NBR 5739/94 – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto, aos 3 e 28 dias de idade, sendo que, para cada idade, foram moldados 3 cp's. Na Tabela 12 encontram-se os materiais que compuseram as pontes de aderência e a quantidade de corpos-de-prova a serem usados neste ensaio.

**Tabela 12** – Pontes de aderência dos diversos sistemas de reparo e materiais constituintes.

| 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                              |
|                                               | Pasta cimentícia 10% de adição de Sílica Ativa. (a/aglom. = 0,20) | 3                            | 3 e 28        | 6                         | 6                              |
|                                               | Pasta cimentícia 10% de adição de Metacaulim. (a/aglom. = 0,20)   | 3                            | 3 e 28        | 6                         | 6                              |
|                                               | Adesivo epóxi para superfície úmida.                              | 3                            | 3 e 28        | 6                         |                                |
|                                               | Adesivo epóxi para superfície seca.                               | 3                            | 3 e 28        | 6                         | 6                              |
|                                               | <i>Primer</i> epóxi para superfície úmida.                        | 3                            | 3 e 28        | 6                         |                                |
|                                               | Resina acrílica para superfície úmida                             | 3                            | 3 e 28        | 6                         |                                |
| SUBTOTAL DE CP'S (10x20) =                    |                                                                   |                              |               | 42                        | 24                             |
| TOTAL DE CP'S (10x20) =                       |                                                                   |                              |               | 66                        |                                |

A sílica ativa e o metacaulim foram adicionados à composição substituindo 10% da massa de cimento por igual massa de pozolana.

As pastas cimentícias e os adesivos epóxi para superfície seca e para superfície úmida foram aplicados com espátula de aço; o adesivo acrílico e o *primer* epóxi para superfície úmida foram aplicados segundo indicação do fabricante, por simples saturação e com o auxílio de escova, respectivamente. A figura 20 apresenta os modos de aplicação das diversas pontes de aderência utilizadas.



**figura 20** – Diversos modos de aplicação dos adesivos utilizados na etapa de ponte de aderência (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

Após a aplicação das pontes, os cp's foram colocados dentro dos moldes cilíndricos de aço com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Estes moldes eram, então, apertados convenientemente a fim de que se tornassem estanques ao concreto fresco, o qual foi aplicado com os adesivos ainda no estado fresco, ou pegajoso. A figura 19 ilustra esta condição.

### 3.3 3ª ETAPA – ENSAIO DE ABRASÃO DOS REPAROS

Nesta seção são descritos os procedimentos para a realização dos ensaios de abrasão dos materiais de reparo, desde a preparação do substrato até os cálculos previstos para obtenção dos dados do ensaio de abrasão, conforme a norma ASTM C1138/97 – *Standart Test for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)*.

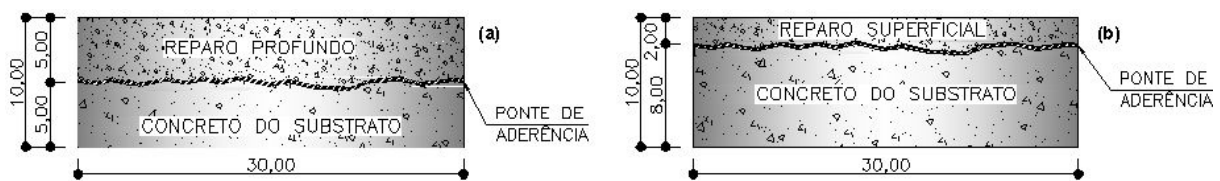
#### 3.3.1 Preparação do Substrato.

Os substratos para o ensaio de abrasão tiveram a intenção de simular o concreto original, tanto em termos de resistência à compressão quanto em relação à superfície característica de um concreto desgastado por abrasão hidráulica. Assim, procurou-se produzir um concreto que apresentasse resistência à compressão axial usual para concretos utilizados nas estruturas hidráulicas, de modo que essa resistência foi determinada como sendo de 20 a 25 MPa. Os resultados de compressão axial obtidos estão dispostos no APÊNDICE B.

**Tabela 13** – Dosagem dos materiais, em peso, para produção do concreto do substrato para o ensaio de abrasão.

| Consumo de cimento<br>(Kg/m³) | Cimento | Areia | Seixo | Água |
|-------------------------------|---------|-------|-------|------|
| 316                           | 1       | 2,03  | 3,6   | 0,67 |

Os corpos-de-prova do substrato moldados para receber os reparos que consistiam de concretos diferiram dos cp's moldados para simular os reparos com argamassas na altura dos cp's, pois os reparos realizados com concretos foram aplicados em um substrato com 50 mm de altura – os reparos com concreto apresentaram, portanto, 50 mm, em média – e os reparos com argamassas foram aplicados em substratos de 80 mm, de forma que as argamassas de reparo foram aplicadas em espessuras médias de 20 mm. A figura 21 ilustra as condições de cada tipo de reparo. Assim, foram definidas duas categorias de reparos: os profundos, a serem executados com concreto e os superficiais, a serem preenchidos com argamassas.



**figura 21** – Corte esquemático dos cp's para o ensaio de abrasão: a) Concreto para reparos profundos; b) Argamassa para reparos superficiais (medidas em cm) (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

Na tentativa de simular as condições dos substratos abradidos encontrados em UHE's, propôs-se uma metodologia na qual o concreto do substrato era desmoldado após 20 horas de aplicado nas fôrmas de PVC criadas especialmente para produzir os corpos-de-prova deste ensaio (figura 22), com 24 horas de idade estes cp's eram colocados nas máquinas de abrasão produzidas de acordo com a norma ASTM C1138 (1997) e ensaiados segundo esta norma por um período ininterrupto de 20 horas, produzindo, assim, superfícies irregulares e polidas. Estas superfícies eram, antes da aplicação da ponte de aderência, limpas com aplicação de água e escova de aço, para a remoção de substâncias que pudessem prejudicar a aderência, conforme a figura 23.





**figura 22** – Desmolgagem dos cp's do substrato após 20 horas de aplicado, destacando o uso e fôrmas de PVC próprias para a confecção destes cp's (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

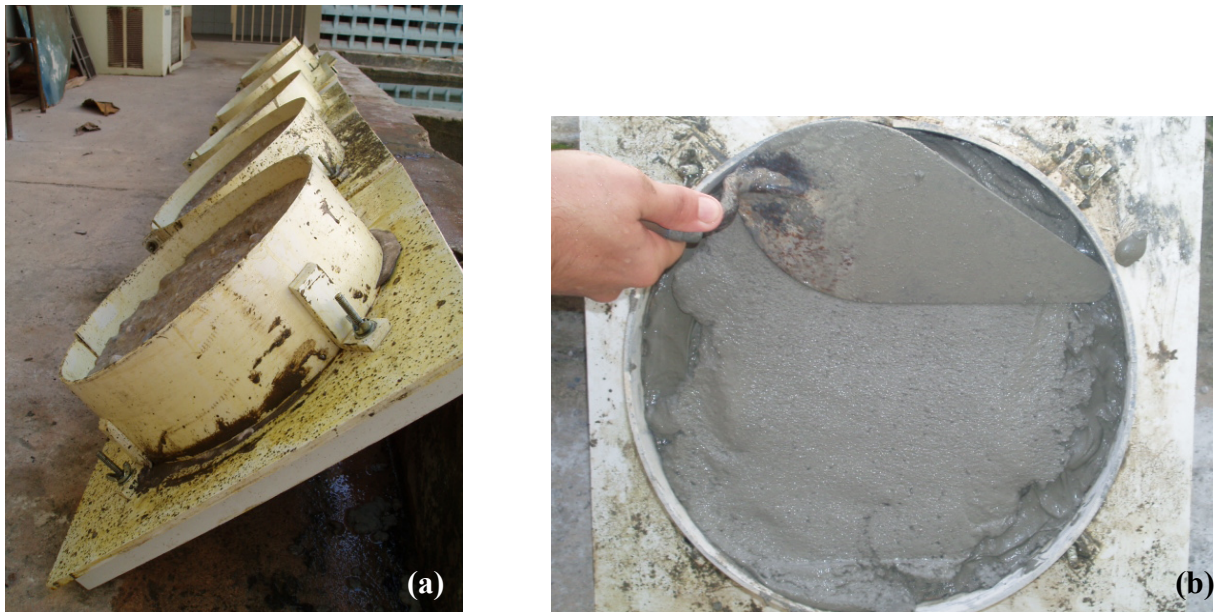


**figura 23** – Aspectos da superfície dos cp's do concreto de referência (substrato), após 20 horas de ensaio na máquina de abrasão ASTM C 1138 (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).



### 3.3.2 Aplicação dos Materiais de Reparo.

À aplicação das argamassas cimentícias de reparo, precedeu-se a aplicação de uma ponte de aderência composta de cimento CP V – ARI, com substituição de 10% do peso deste cimento por igual peso de sílica ativa, uso de aditivo superplastificante de terceira geração e relação a/agl igual a 0,20, nos cp's de abrasão, posicionados dentro das fôrmas e estas, postas apoiadas em uma superfície vertical conforme mostra a figura 24a, na tentativa de simular as condições de aplicação em superfícies verticais. A figura 24b exibe a aplicação das argamassas de reparo. Não foi utilizado qualquer tipo de adesivo para melhorar a aderência da argamassa epóxi (AE) ao cp de concreto do substrato.

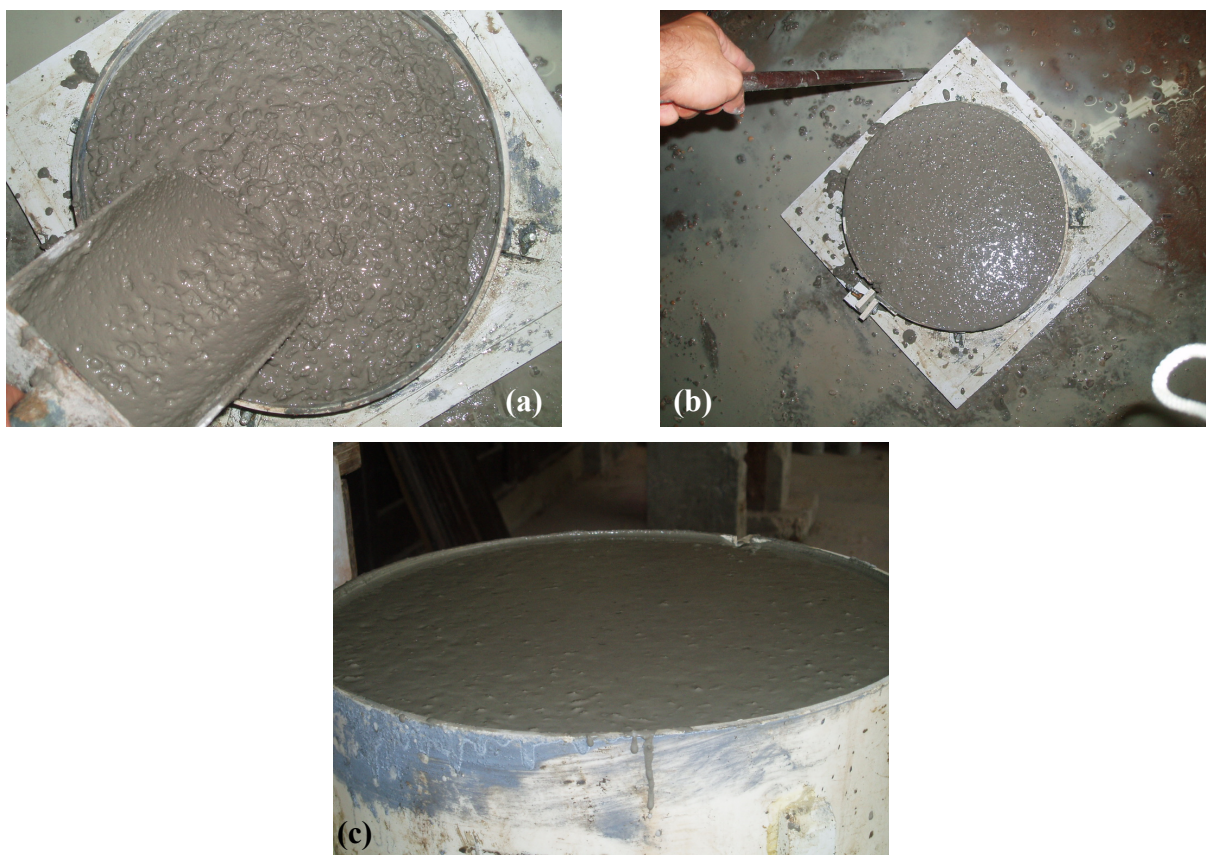


**figura 24** – (a) Posicionamento dos cp's dentro das fôrmas, inclinadas, antes da aplicação das argamassas; (b) aplicação da argamassa AAD M10% em corpo-de-prova com prévia aplicação de pasta cimentícia com adição de 10% de sílica ativa, em peso (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

O acabamento das superfícies das argamassas cimentícias foi realizado com espátulas de aço e colheres-de-pedreiro, tentando tornar as superfícies as mais uniformes possíveis. A argamassa epóxi apresentou o mesmo procedimento de aplicação, porém executou-se o nivelamento da argamassa, já no plano horizontal, com o auxílio de rolo de lã, conforme sugere o fabricante, para selar os poros.

A aplicação dos concretos foi realizada de modo semelhante à das argamassas, com a aplicação anterior da mesma pasta cimentícia com adição de sílica ativa como adesivo. Contudo, devido à escolha do tipo de material, fluido, “auto-adensável”, a ser utilizado, o procedimento de aplicação consistiu de derramamento do concreto sobre o substrato coberto

com a pasta cimentícia e a aplicação de golpes com bastão de aço ao lado da fôrma, até o completo preenchimento do restante da fôrma, com posterior acabamento da superfície com colher-de-pedreiro (figura 25).



**figura 25** – Seqüência de aplicação dos reparos profundos: (a) aplicação do concreto por derramamento; (b) adensamento do concreto através de golpes na lateral da fôrma de PVC; (c) aspecto do cp após moldagem, ilustrando a ausência de segregação e a superfície do topo nivelada (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

### 3.3.3 Materiais de Reparo Utilizados.

Como mencionado anteriormente, os reparos foram divididos em reparos superficiais e reparos profundos e, para cada um, foi estabelecido o tipo de material a ser utilizado como reparo: argamassa ou concreto, respectivamente. Os materiais utilizados nesta etapa foram os mesmos utilizados na 1ª ETAPA (item 3.1.5) da pesquisa. A Tabela 14 apresenta os materiais utilizados, de acordo com a sua classificação:

**Tabela 14** – Resumo dos materiais utilizados nos ensaio de consistência, resistência e abrasão.

| REPAROS                                  |                                                                   | IDADES <sup>3</sup><br>(dias) | Nº DE<br>CP's POR<br>IDADE | Nº TOTAL DE CP's/MATERIAL<br>(300x100mm) |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|
| TIPO                                     | MATERIAL                                                          |                               |                            |                                          |
| REPAROS<br>SUPERFICIAIS<br>(e = 20,0 mm) | Argamassa cimentícia sem adição de pozolana (AAD 0%)              | 3 e 28                        | 3                          | 6                                        |
|                                          | Argamassa cimentícia com adição de sílica ativa (AAD S10%)        | 3 e 28                        | 3                          | 6                                        |
|                                          | Argamassa cimentícia com adição de metacaulim (AAD M10%)          | 3 e 28                        | 3                          | 6                                        |
|                                          | Argamassa epóxi (AE)                                              | 3 e 28                        | 3                          | 6                                        |
| REPAROS<br>PROFUNDOS<br>(e = 50,0 mm)    | Concreto de alto desempenho sem adição de pozolana (CAD 0%)       | 3 e 28                        | 3                          | 6                                        |
|                                          | Concreto de alto desempenho com adição de sílica ativa (CAD S10%) | 3 e 28                        | 3                          | 6                                        |
|                                          | Concreto de alto desempenho com adição de metacaulim (CAD M10%)   | 3 e 28                        | 3                          | 6                                        |
| <b>TOTAL:</b>                            |                                                                   |                               | <b>21</b>                  | <b>42</b>                                |

### 3.3.4 Metodologia do Ensaio de Abrasão.

O ensaio de abrasão em corpos-de-prova de concreto foi realizado de acordo com a norma americana ASTM C1138, a qual procura simular, em superfícies de concreto, o atrito de partículas sólidas carregadas pelo fluxo de água.

Neste experimento obtém-se o volume de cada corpo-de-prova em instantes determinados. O corpo-de-prova permanece em ensaio por 72 horas, sendo efetuadas medições do seu volume no intervalo de 12 horas, totalizando sete medições (incluindo a medição a zero hora, caracterizando o volume inicial).

O volume de cada cp é calculado, para cada instante de tempo, segundo a Equação 1:

$$V_t = \frac{W_a - W_w}{G_w} \quad (1)$$

Onde:

$V_t$  = volume do corpo-de-prova no tempo “t”, em litros (l);

$W_a$  = massa do cp no tempo “t”, no ar, em Kg;

<sup>3</sup> As idades indicadas são as idades dos corpos-de-prova no início do ensaio de abrasão.

$W_w$  = massa aparente do cp, em Kg e

$G_w$  = massa específica da água, em Kg/l.

Assim, o desgaste dos cp's é medido em relação ao volume de material perdido, tomado como a diferença entre o volume inicial de cada cp e o seu volume a um dado instante, conforme a Equação 2:

$$VL_t = V_t - V_i \quad (2)$$

O resultado dos ensaios é dado, então, pelo volume de material perdido ou desgastado para cada intervalo de 12 horas. Nesta ocasião, para comparação entre os materiais, foi usado o desgaste ao final do ensaio, isto é, com 72 horas de abrasão da superfície dos corpos-de-prova.

Outra maneira de apresentar os resultados do ensaio, segundo a norma ASTM C1138/97, é obter a altura média de desgaste, que é calculada de acordo com a Equação 3:

$$ADA_t = VL_t / A \quad (3)$$

Onde:

$ADA_t$  = profundidade média de abrasão (desgaste) ao final do incremento de tempo em questão, em mm;

$A$  = Área do topo do corpo-de-prova, em m<sup>2</sup>.

## 4 Análise de Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios relacionados no capítulo anterior, bem como as suas respectivas análises.

### 4.1 1ª ETAPA – CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Consistência dos Materiais de Reparo

Os materiais de reparo aqui testados devem possuir características que favoreçam os seus empregos *in loco*. Uma de suas características mais importantes é a consistência. Para a aplicação do material no local – tubo de sucção em concreto – deve-se atentar para a necessidade de aplicações nas paredes, portanto, em superfícies verticais e no teto do tubo de sucção, onde é provável que ocorram anomalias. Para que sejam úteis, os reparos superficiais devem ter uma consistência tal que não escoem quando aplicados em superfícies horizontais e não descolem por ação da própria gravidade quando aplicados em tetos. No caso dos reparos profundos, a serem executados com concretos, optou-se pela escolha de materiais com grande fluidez e coesão, para que pudessem ser aplicados por gravidade, contidos por fôrmas, quando aplicados em superfícies horizontais, ou bombeados quando aplicados em tetos (sobrecabeça).

Na Tabela 15 lista-se as argamassas utilizadas nesta atividade, com as suas respectivas consistências na Mesa de Queda (média de duas medidas ortogonais, conforme NBR 7215):

**Tabela 15** – Consistências das argamassas usadas, em mm.

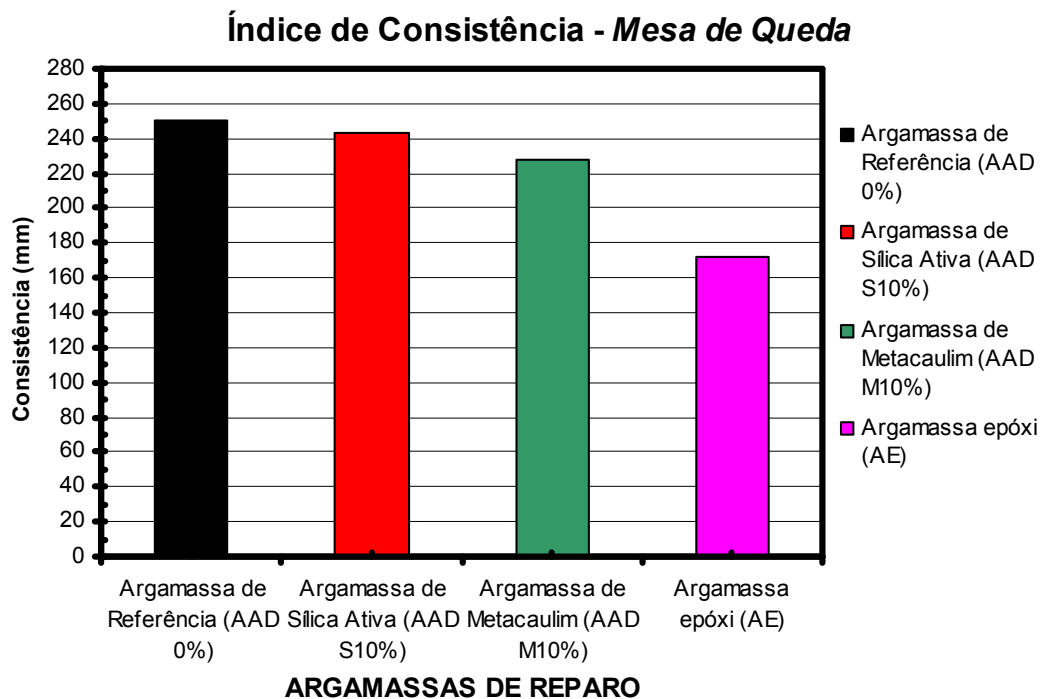
| ARGAMASSAS   | REFERÊNCIA (AAD 0%) | SÍLICA ATIVA (AAD S 10%) | METACAILIM (AAD M 10%) | ARGAMASSA ÉPOXI (AE) |
|--------------|---------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|
| CONSISTÊNCIA | 249,88 mm           | 243,43 mm                | 227,68 mm              | 172,00 mm            |

Da Tabela 15 pode-se observar que as argamassas com adições de pozolanas, obtiveram uma consistência menos fluida, mais coesa que a argamassa de referência, sem adição de pozolana. Estes resultados já eram esperados, pois os grãos das pozolanas apresentam diâmetros médios bem menores que o dos grãos de cimento, aumentando a superfície específica do material, requerendo, assim, ou uma maior quantidade de água para alcançar uma mesma trabalhabilidade ou, como neste caso, uma menor trabalhabilidade para uma mesma quantidade de água. Além disso, de acordo com as expectativas, as argamassas cimentícias com metacaulim e sílica ativa apresentaram uma coesão bem maior que a de referência, provavelmente pelo alto teor de materiais finos (materiais com diâmetro nominal médio bem menor que o do cimento em si). Deste modo, o emprego destes dois materiais

seria vantajoso para a aplicação na UHE de Curuá-Una. O valor superior obtido pela argamassa com adição de sílica em relação à de metacaulim pode ser explicado pelo formato esférico das partículas de sílica, o qual favorece o deslocamento entre os grãos do material, funcionando como um lubrificante. O mesmo não se pode constatar para a argamassa aditivada com metacaulim de alta reatividade, pois as suas partículas apresentam formato irregular, não contribuindo para o efeito de lubrificação anteriormente mencionado.

A argamassa de base epóxi, apresentou uma menor consistência, já aguardada, pois, de acordo com o seu fabricante, este produto pode ser aplicado por meio de espátula. Devido à pré-dosagem dos seus três componentes, espera-se que ocorra uma pequena variação do valor conseguido nesta atividade em relação a uma possível aplicação em obra, pois a temperatura ambiente não deve sofrer grandes variações a ponto de interferir significativamente na consistência.

A figura 26 representa ilustra os valores de consistência das argamassas de reparo utilizadas.



**figura 26** – Consistência, em mm, das argamassas de reparo pela NBR 7215 (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

Percebeu-se que as consistências das três argamassas cimentícias obtiveram, de certa forma, valores semelhantes quando comparadas com a argamassa epóxi. Este fato pode ser

explicado pelo uso dos mesmos materiais em todas as 3 argamassas cimentícias. Sabe-se que qualquer pequena variação de lote para lote na fabricação do cimento influi nas características reológicas de um mesmo tipo de cimento de um fabricante qualquer, bem como a mudança de aditivo superplastificante (AİTCIN, 2000). Cada cimento, ou tipo de cimento, possui certa consistência quando misturado com um determinado tipo de superplastificante. Logo, se for realizada uma mistura com os mesmos materiais, exceto o aditivo, podem-se obter valores completamente diferentes dos aqui alcançados.

A sílica ativa, apesar de ter diâmetro nominal menor que o do metacaulim, atingiu valor de consistência superior ao deste, indo de encontro ao fato de que os materiais mais finos, por possuírem área específica maior, obtêm consistências inferiores por demandarem maiores consumos de água para a molhagem dos seus grãos (BAUER, 1987). Porém, o formato esférico das partículas de sílica ativa favorece o deslizamento entre as próprias partículas de sílica, entre os grãos de cimento e areia e entre a água e o ar contidos na mistura, enquanto que a forma irregular das partículas de metacaulim prejudica tal deslizamento.

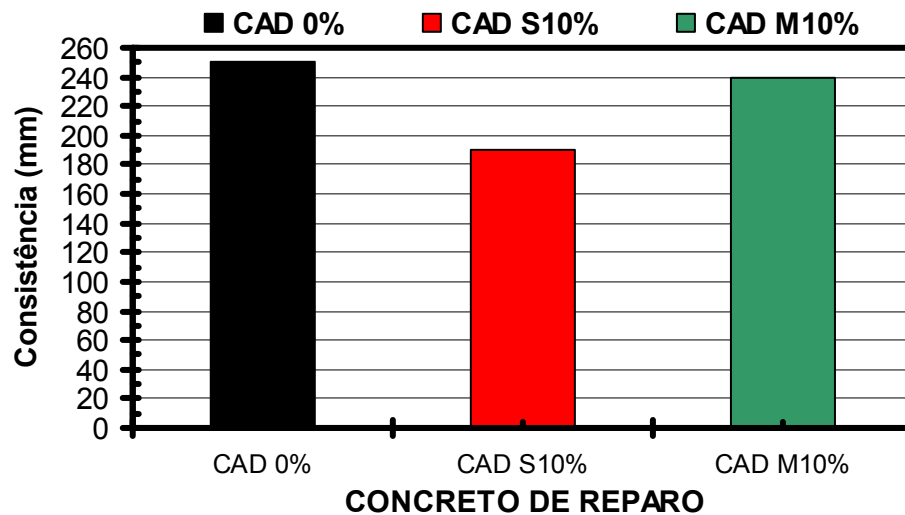
Em geral, todos os materiais aqui utilizados alcançaram consistências que possibilitam os seus empregos *in loco*, com destaque para as argamassas cimentícias, as quais apresentaram grande coesão, em especial, ainda, as com adição das pozolanas. A argamassa epoxídica não apresentou grande aderência às superfícies úmidas e verticais, em primeira análise, quando aplicadas com espátula. O próprio fabricante indica o deslizamento de rolo de lã na superfície para o fechamento dos poros e, deste modo, a argamassa apresentou excelente acabamento de superfície.

Conforme mencionado anteriormente, os concretos utilizados como reparos profundos foram dosados para que possuísem elevada fluidez, facilitando a aplicação *in loco*. A Tabela 16 e a figura 27 apresentam os resultados de consistência do abatimento do tronco de cone.

**Tabela 16** – Resultados da consistência das misturas de concreto dos reparos, em mm.

| CONCRETOS    | REFERÊNCIA | SÍLICA ATIVA | METACAILIM |
|--------------|------------|--------------|------------|
| CONSISTÊNCIA | 250,0 mm   | 190,0 mm     | 240 mm     |





**figura 27** – Apresentação gráfica das consistências dos CAD's obtidas (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

De acordo com a Tabela 16 e a figura 27, constatou-se que foram obtidas as fluidez esperadas para a aplicação dos materiais no local. Deve ser comentado que, diferentemente do ocorrido com as argamassas, o CAD S10% apresentou consistência aquém da obtida com o concreto com adição de metacaulim de alta reatividade (CAD M10%) e, um pouco abaixo do esperado ( $220 \pm 20$  mm), porém sem comprometer a aplicação. Esta pequena diferença pode ser justificada pela mudança de operador na realização do ensaio de abatimento do tronco de cone, em comparação com os outros dois concretos. Por outro lado, o CAD 0% apresentou valor um pouco acima da expectativa. Este resultado vai ao encontro do relatado por Bauer (1987) e observado nas argamassas, nas quais a mistura sem adição apresentou maiores valores de consistência quando comparada com as demais. Todavia, este acréscimo não influenciou nas propriedades nos estados fresco e endurecido do concreto de alto desempenho sem adição de pozolana (CAD 0%). Em conformidade com a figura 25, verifica-se que não ocorreu segregação dos componentes do concreto tanto na aplicação quanto no adensamento.

#### 4.1.2 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial de um determinado material fornece, além da idéia sobre a capacidade de resistência às tensões de compressão de uma peça feita do material, uma idéia geral de praticamente todos os tipos de resistências, inclusive da resistência ao desgaste ou à abrasão do material, o que interessa diretamente a esta pesquisa. Devido à



facilidade e simplicidade desse ensaio, vários autores pesquisam correlações entre a resistência à compressão axial e outras grandezas do material.

A Tabela 17 apresenta os valores médios de resistências de, no mínimo, três corpos-de-prova obtidos nesta atividade<sup>4</sup>. (APÊNDICE C)

Os valores de resistência à compressão do concreto do substrato aos 3 e 7 dias não foram obtidos devido ao fato de que o concreto da UHE de Curuá-Una apresenta idades bem superiores a 28 dias, não sendo necessária a obtenção das resistências às idades inferiores.

**Tabela 17** – Resultados de resistência à compressão axial das argamassas de reparo.

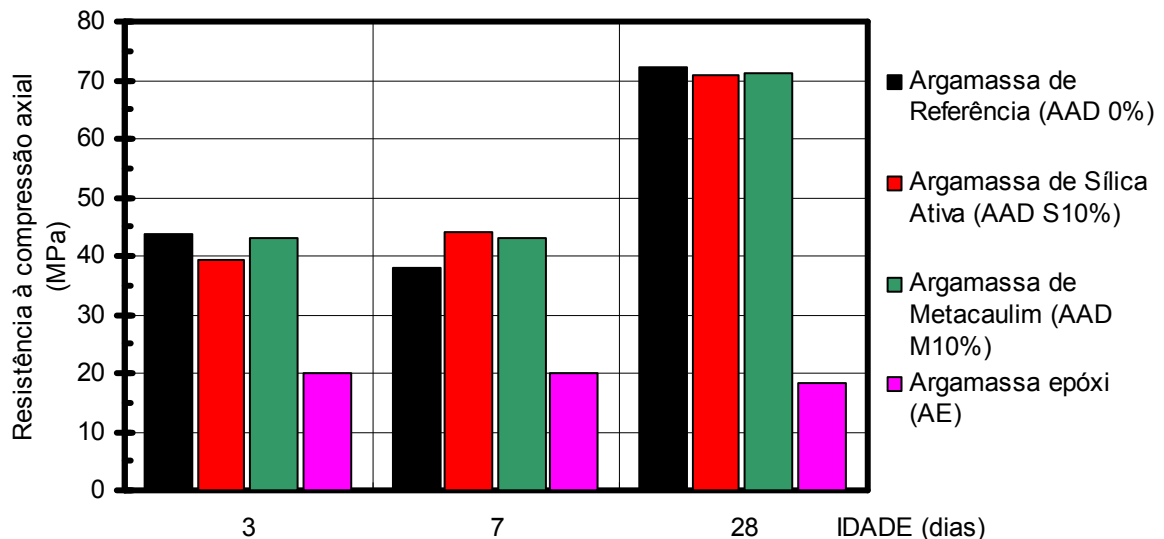
| MATERIAIS                       | MÉDIA DA TENSÃO DE RUPTURA (MPa) |        |         |
|---------------------------------|----------------------------------|--------|---------|
|                                 | 3 dias                           | 7 dias | 28 dias |
| Argamassa de Referência         | 43,74                            | 37,99  | 72,25   |
| Argamassa de Sílica Ativa (10%) | 39,33                            | 44,01  | 70,75   |
| Argamassa de Metacaulim (10%)   | 42,94                            | 43,12  | 71,13   |
| Argamassa epóxi                 | 19,94                            | 19,98  | 18,29   |

Da Tabela 17 observou-se, inicialmente, que as argamassas a base de cimento atingiram resistências bem superiores à obtida pelo concreto do substrato e a argamassa epoxídica apresentou valores um pouco menores que o do concreto.

As variações negativas obtidas quando comparadas às resistências aos 3 e 7 dias deve-se, provavelmente, a variações do ensaio de compressão e problemas com a moldagem dos espécimes.

A figura 28 fornece a evolução das resistências das argamassas, em função do tempo, para as idades de 3, 7 e 28 dias.

<sup>4</sup> Os resultados dos ensaios e resistência à compressão axial da argamassa de referência (AAD 0%) e da argamassa com adição de metacaulim (AAD M10%), aos 3 dias, são obtidos da média de dois cp's, devido à problemas na moldagem do terceiro cp.



**figura 28** – Evolução das resistências das argamassas de reparo com o tempo (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

Analisando a figura 28 percebe-se que todas as argamassas cimentícias tiveram as suas resistências à compressão aumentadas com o tempo, especialmente dos 7 aos 28 dias, evidenciando a continuação da hidratação dos grãos de cimento e mesmo da reação pozolânica, para as argamassas com adições minerais. Como já era esperado, a argamassa epóxi atingiu o seu pico de resistência logo aos 3 dias de idade, a partir o qual não apresentou ganho de resistência significativo até os 7 dias, reduzindo o seu valor na idade de 28 dias.

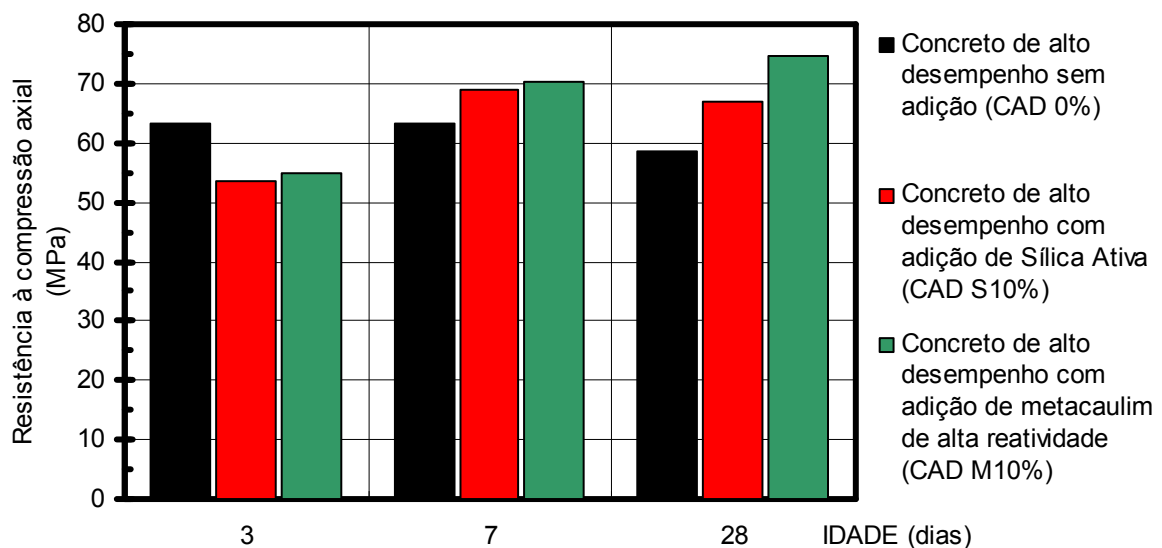
A diferença entre as resistências das argamassas, tanto aos 3 quanto aos 28 dias de idade não variou significativamente em função dos acréscimos de pozolanas. Também se percebe uma diferença irrisória entre as resistências das argamassas aos 3 e 7 dias.

Para os concretos, a resistência foi obtida tomando-se a média de três corpos-de-prova cilíndricos de 10x20cm (diâmetro X altura). A Tabela 18 mostra a média dos valores obtidos (os resultados de compressão axial encontram-se no APÊNDICE C):

**Tabela 18** – Resultados médios de resistência à compressão dos concretos de reparo.

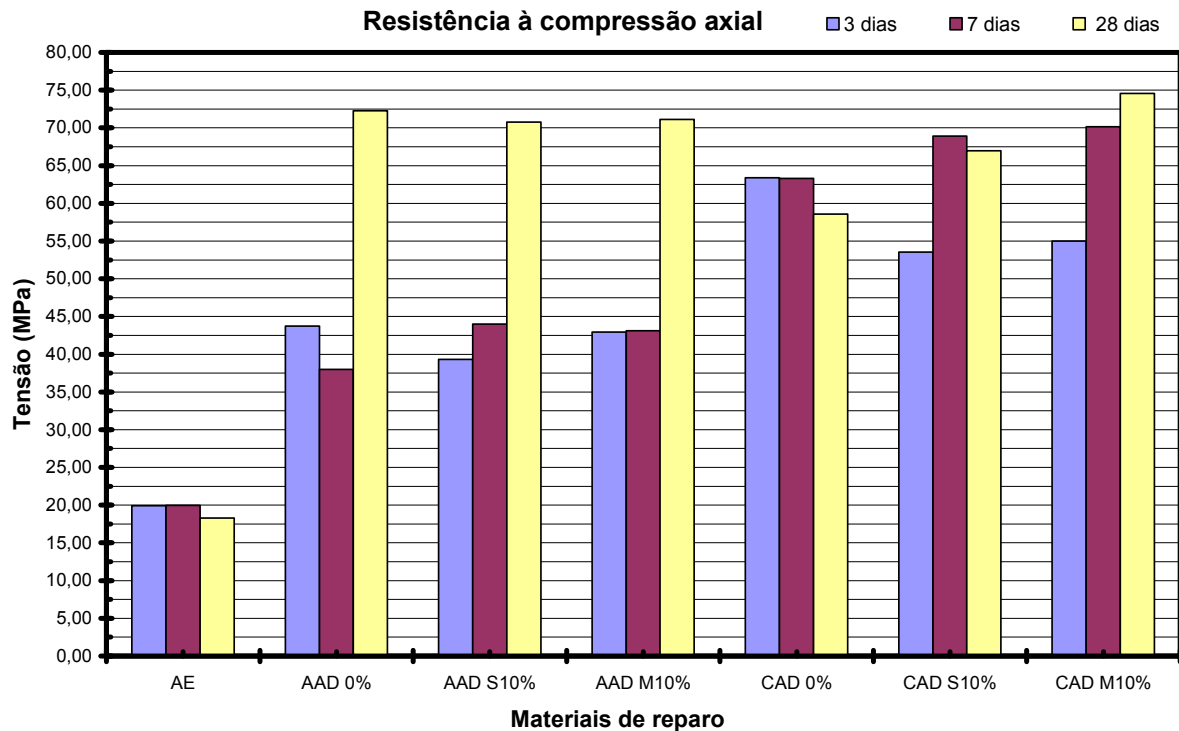
| MATERIAIS                                                                           | TENSÃO DE RUPTURA (MPa) |        |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------|---------|
|                                                                                     | 3 dias                  | 7 dias | 28 dias |
| Concreto de alto desempenho sem adição (CAD 0%)                                     | 63,37                   | 63,30  | 58,57   |
| Concreto de alto desempenho com adição de Sílica Ativa (CAD S10%)                   | 53,56                   | 68,93  | 66,96   |
| Concreto de alto desempenho com adição de metacaulim de alta reatividade (CAD M10%) | 55,01                   | 70,16  | 74,58   |
| Concreto do Substrato                                                               | --                      | --     | 24,36   |

Através da Tabela 18, percebe-se a mesma tendência das argamassas de reparo, no que concerne ao desenvolvimento da resistência dos compostos cimentícios com o passar do tempo. As maiores resistências foram obtidas pelos compostos sem adição (CAD 0%) e com adição de metacaulim (CAD M10%), porém, o primeiro não apresentou incrementos nas suas resistências aos 7 e 28 dias. Quanto ao concreto com sílica ativa (CAD S10%) a resistência aumentou com a mesma intensidade do aumento obtido pelo CAD M10%, e se estabilizou até a idade de 28 dias. Como pode ser observado na figura 29, a resistência do CAD 0% foi menor que a dos compostos com adições, exceto à idade de 3 dias, na qual prevaleceu a rápida hidratação dos grãos do cimento CP V – ARI utilizado.

**figura 29** – Evolução das resistências dos concretos de reparo (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

Assim como as argamassas, os concretos não apresentaram grandes diferenças entre suas resistências, em função da presença ou não de adições pozolânicas, em geral, exceto aos 28 dias, para as argamassas AAD 0% e AAD M10%, onde esta apresentou resistência à compressão axial de aproximadamente 27% superior àquela. Porém, como já fora mencionado, a resistência do CAD 0% estabilizou-se logo à idade de 3 dias, sendo que a pequena variação negativa de sua resistência em relação aos 28 dias de idade pode ser atribuída a variações no equipamento de ensaio.

A figura 30 mostra um resumo das resistências obtidas pelos materiais de reparo, às idades de 3, 7 e 28 dias. De imediato que, assim como fora relatado anteriormente, a resistência à compressão axial da argamassa epóxi (AE) foi cerca de metade da menor resistência obtida pelos compostos cimentícios, a qualquer idade. Também se observou que as resistências das argamassas aos 3 e 7 dias foram inferiores às respectivas resistências dos concretos de composições similares, contudo, aos 28 dias de idade, as argamassas alcançaram níveis de resistência, em geral, maiores que os obtidos pelos concretos; enquanto os concretos alcançaram elevadas resistências logo aos 3 dias, as argamassas experimentaram um elevado aumento de suas resistências entre as idades de 7 e 28 dias. Os fatos dos concretos, em geral, não terem apresentado um aumento significativo de resistência no decorrer do tempo, é explicado pelo alcance do patamar máximo de resistência dos agregados graúdos (seixo), cujos cp's sofreram rupturas intragranulares. Em relação às argamassas, o elevado acréscimo geral de suas resistências é explicado pela complementação da hidratação dos grãos de cimento Portland.



**figura 30** – Evolução média das resistências dos materiais de reparo utilizados na pesquisa (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

#### 4.2 2ª ETAPA – PONTE DE ADERÊNCIA

Como dito anteriormente, o ensaio de ponte de aderência inicialmente serve para avaliar a eficiência dos materiais utilizados na adesão entre o concreto do substrato e o reparo, comparando a resistência obtida nos corpos-de-prova preparados conforme explicado no item 2.4 com os cp's moldados como referência para resistência às idades de 3 e 28 dias. Assim, considera-se que para valores de resistências dos cp's da ponte próximos aos valores do concreto de referência, o adesivo utilizado promoveu aderência satisfatória.

A dificuldade de elaboração e utilização de materiais com esta finalidade, para a execução na UHE de Curuá-Una, vem da necessidade de certas características de aplicação, pois o substrato se encontra bastante úmido e podem ocorrer 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 ao desgaste.

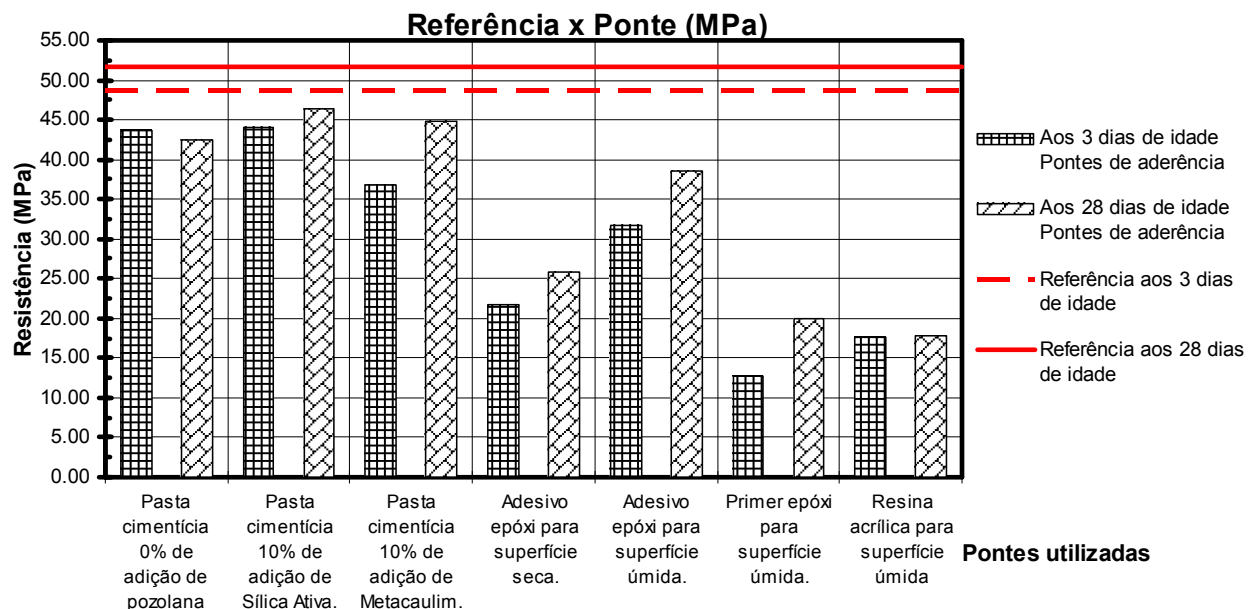
Os materiais que foram utilizados estão dispostos na Tabela 19. Cabe ressaltar que a resistência de projeto para o concreto de referência (substrato) foi de 50 MPa aos 3 dias de

idade. Observa-se na referida tabela que a média dos valores de resistências dos corpos-de-prova ensaiados foi bem próxima da resistência especificada inicialmente.

**Tabela 19** – Resultados das resistências à compressão aos 3 e 28 dias dos materiais utilizados.

| CONCRETO DO SUBSTRATO                           | 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.      | 43.55                          | 48.45      | 42.50                | 51.74      |
| Pasta cimentícia 10% de adição de Sílica Ativa. | <b>44.03</b>                   | 48.45      | <b>46.34</b>         | 51.74      |
| Pasta cimentícia 10% de adição de Metacaulim.   | 36.75                          | 48.45      | 44.80                | 51.74      |
| Adesivo epóxi para superfície seca.             | 21.80                          | 48.45      | 25.82                | 51.74      |
| Adesivo epóxi para superfície úmida.            | 31.71                          | 48.45      | 38.53                | 51.74      |
| Primer epóxi para superfície úmida.             | 12.64                          | 48.45      | 19.95                | 51.74      |
| Resina acrílica para superfície úmida           | 17.59                          | 48.45      | 17.88                | 51.74      |

A figura 31 compara as resistências médias obtidas pelos corpos-de-prova colados com as pontes de aderência com as resistências médias dos cp's dos concretos de referência, para as idades de 3 e 28 dias.

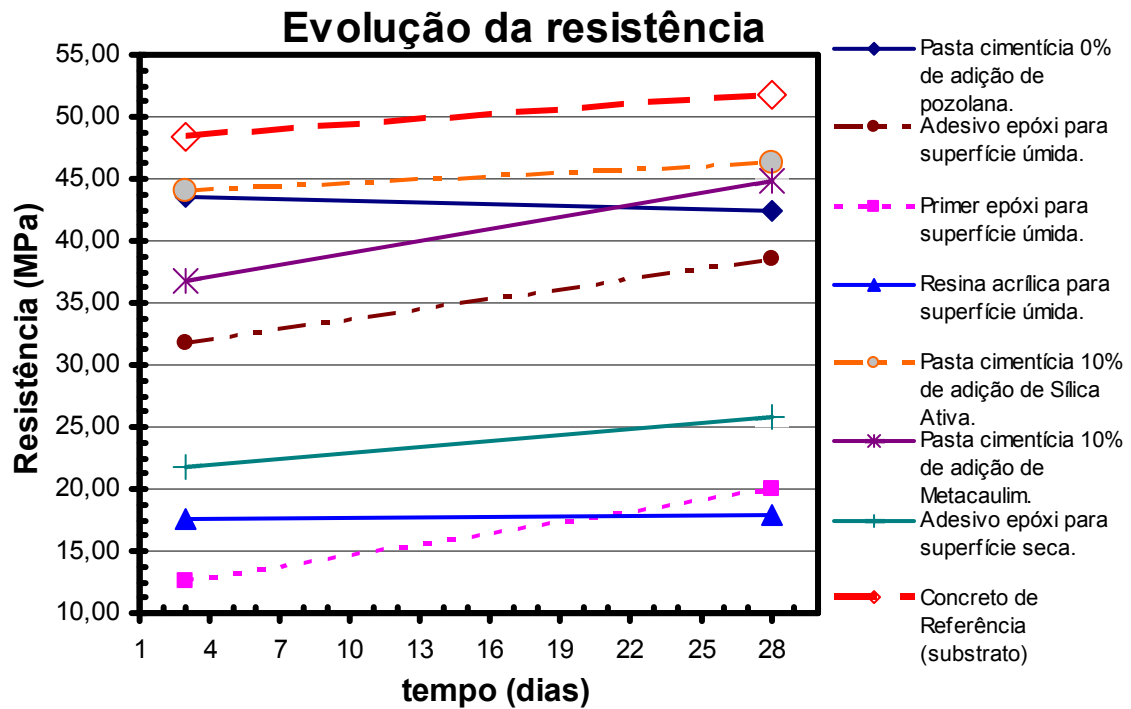


**figura 31** – Comparação das resistências dos concretos de referência com as obtidas pelas respectivas pontes de aderência realizadas, para as idades de 3 e 28 dias (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

Da Tabela 19 e da figura 31 percebe-se, inicialmente, que nenhum dos adesivos testados alcançou, na média, valores de resistência iguais à média dos resultados obtidos pelos concretos do substrato, usados como referência para a comparação do desempenho das pontes de aderência. Nenhum dos materiais utilizados alcançou, mesmo aos 28 dias, a resistência média aos 3 dias dos concretos de referência. Nota-se que as pontes de aderência das pastas cimentícias obtiveram desempenho bem superior à maioria das pontes produzidas com materiais industrializados, isto é, as três resinas epóxis e a resina acrílica, produzidas em escala industrial.

Dentre todos os adesivos, o que obteve a maior resistência média dos cp's para as idades de 3 e 28 dias foi a pasta cimentícia com adição de sílica ativa, seguida da pasta cimentícia sem adição para a idade de 3 dias e desta e, principalmente, da pasta com adição de metacaulim para as idades de 28 dias. Quanto aos materiais ditos industrializados, o que obteve maior resistência à compressão axial foi o adesivo epóxi para superfícies úmidas, com resistências aos 3 e 28 dias bem superiores aos demais industrializados. Em seguida, o adesivo epóxi para superfície seca, apresentou resistências já aos 3 dias maiores que a média dos cp's colados com *primer* epóxi para superfícies úmidas e com resina acrílica, mesmo a 28 dias de idade.

A seguir, na figura 32 tem-se a evolução de resistência média dos cp's utilizados nesta atividade.



**figura 32** – Evolução da média das resistências dos cp's dos 3 aos 28 dias de idade (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

Percebe-se claramente, na figura 32, que a pasta cimentícia com adição de sílica ativa apresentou o melhor desempenho dentre todos os materiais, com valores de resistências próximos e evolução da mesma similar, quando comparada com a pasta cimentícia sem adição. Alguns materiais, como a pasta cimentícia com adição de sílica ativa e o próprio concreto do substrato, apresentaram pouco incremento na resistência à compressão axial no período de 3 a 28 dias. Isto se deve ao uso de cimento de alta resistência inicial, CP V-ARI. A pasta com adição de metacaulim apresentou resistência aos 3 dias inferior a da pasta cimentícia sem adição, possivelmente pelo menor número de grãos de cimento de alta resistência inicial na mistura, substituídos por grãos de metacaulim de alta reatividade. A reação pozolânica do metacaulim com produtos da reação de hidratação do cimento é mais lenta que esta, em si, explicando o porquê do maior aumento de resistência dos cp's da pasta com metacaulim em relação às pastas de cimento sem adição e com adição de sílica. Reações semelhantes ocorrem entre os produtos de hidratação do cimento e a sílica ativa. Logo, a evolução das resistências das pastas com adições minerais deveria ser similar e, de fato, não foi. Uma possível justificativa para isto é que, aos 3 dias, devido ao formato esférico das partículas de sílica obteve-se um melhor empacotamento das partículas, diminuindo os vazios (e o tamanho deles) e aumentando a resistência. Assim a alta resistência dos cp's colados com



pastas de cimento com adição de sílica para a idade de 3 dias pode ser atribuída ao efeito físico de empacotamento das partículas.

Considerando as conclusões de Villaba *et al.* (2002), procurou-se comparar o desempenho do adesivo epóxi para aplicação em superfície úmida com outro adesivo epóxi, porém indicado para superfícies secas. Os autores supracitados apresentaram em seus resultados uma melhor eficiência deste em relação àquele. Contudo, quanto aos materiais industrializados, o que apresentou melhor desempenho foi o adesivo epóxi para superfícies úmidas, confirmando a finalidade para o qual foi produzido.

De maneira geral, pode-se dizer que todos os espécimes colados com os adesivos ditos industrializados apresentaram resistência ao cisalhamento na junta menor que a resistência de um cp íntegro. A figura 33 representa o modo de ruptura de 3 destes materiais aos 3 dias de idade. Dos 24 cp's colados com esses produtos, apenas um rompeu monoliticamente, isto é, sem descolamento da junta, porém, este cp rompeu com resistência muito inferior aos demais, sendo seu resultado desconsiderado na análise estatística dos dados. A figura 34 ilustra a ruptura dos cp's colados com adesivo epóxi para superfícies úmidas aos 28 dias de idade.



**figura 33** – Ruptura dos cp's colados com materiais “industrializados”, aos 3 dias de idade, na junta diagonal de colagem (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).



**figura 34** – Ruptura na ponte de aderência dos cp's colados com adesivo epóxi para superfícies úmidas, aos 28 dias de idade (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

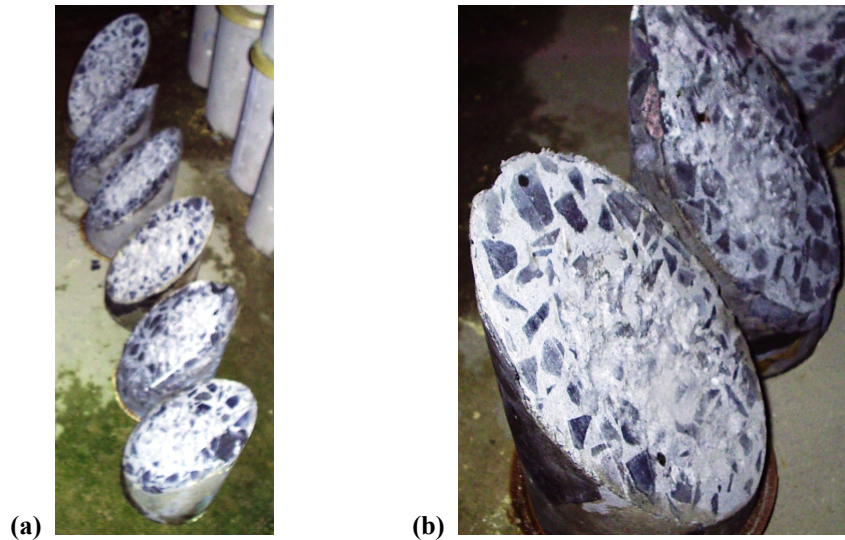
Alguns cp's apresentaram rupturas monolíticas, todavia com resistências bem aquém das esperadas e das obtidas pelos outros corpos-de-prova de mesma idade e mesmo material. Rupturas deste tipo, ocorridas no concreto velho sugerem danificações nos indivíduos, provocadas provavelmente no ato de corte dos mesmos. Como exemplo, cita-se o cp número 5, aos 28 dias de idade, colado com pasta cimentícia com adição de sílica ativa, que rompeu com uma resistência de aproximadamente 51% da média das resistências dos outros dois testemunhos. O aspecto desse corpo-de-prova após a ruptura é apresentado na figura 35.



**figura 35** – Vistas do cp 05, colado com pasta cimentícia com adição de sílica ativa, aos 28 dias, denotando ruptura no concreto velho e no final da ponte de aderência. Apesar deste tipo de ruptura, o referido cp não foi considerado na análise dos dados devido à sua baixa resistência quando comparado aos demais (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

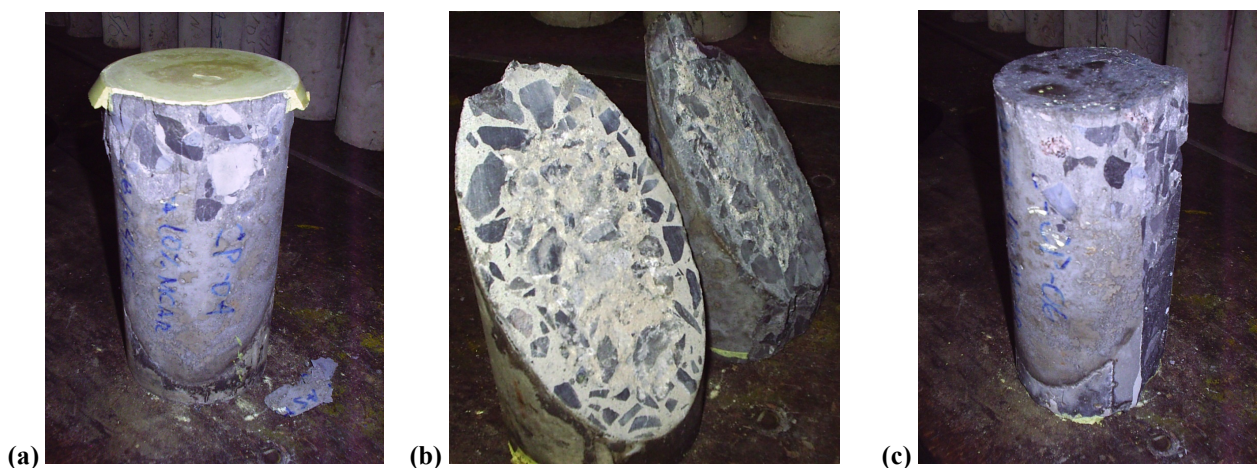


A ruptura na junta diagonal predominou em quase todos os cp's, inclusive nos colados com pasta cimentícia adicionada com 10 % de sílica ativa, em peso. Contudo, nos cp's colados com pasta cimentícia com adição de 10% de MCAR, a ruptura predominante foi monolítica, geral, ocorrendo em todo o comprimento do espécime. A figura 36 mostra os cp's colados com pasta cimentícia sem adição de pozolana rompidos aos 3 dias de idade, onde ocorreram rupturas somente na junta diagonal de adesão.



**figura 36** – a) vista geral dos cp's colados com pasta cimentícia, aos 3 dias de idade; b) detalhe da ruptura destes cp's (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

A figura 37 mostra a ruptura dos testemunhos colados com pasta cimentícia com adição de MCAR, aos 28 dias de idade. Destaca-se na referida figura o único cp que rompeu na junta diagonal de colagem (cp 05).



**figura 37** – Ruptura, aos 28 dias, dos cp's colados com pasta cimentícia com adição de metacaulim. a) cp 04; b) cp05 – o único deste tipo de material que apresentou ruptura no adesivo (aos 28 dias) e c) cp 06 (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

De posse das figuras anteriores, observa-se que a superfície de colagem, isto é, o seu preparo, é de fundamental importância para uma boa adesão entre reparo e substrato. A ancoragem física constatada fez com que os cp's colados com as pastas cimentícias e o adesivo epóxi indicado para superfícies úmidas simplesmente explodissem quando rompidos por compressão axial. No momento da ruptura desses cp's, ouvia-se um estrondo como o de uma explosão e os cp's, depois de soltas algumas de suas lascas, tinham as suas metades arremessadas. Isto levou à improvisação de proteções com chapas de madeira para evitar qualquer acidente. A ruptura dos cp's colados com o adesivo epóxi para superfícies secas, resina acrílica para superfícies úmidas e *primer* epóxi para superfícies úmidas apresentaram rupturas consideradas como normais e com a queda da metade superior do cp, apenas. A figura 38 ilustra a seqüência de ensaio para um cp que apresentou este tipo de ruptura.



**figura 38** – Ruptura usual de cp colado com adesivo epóxi para superfícies secas, aos 28 dias (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

Os cp's de referência também explodiram quando rompidos, para ambas as idades de ensaio. A figura 39 apresenta o aspecto destes cp's após ruptura aos 28 dias de idade.



**figura 39** – Aspecto dos cp's de referência depois de rompidos (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

O ensaio de ponte de aderência serve inicialmente para avaliar a eficiência dos materiais utilizados na adesão entre o concreto do substrato e o reparo, comparando a resistência obtida nos corpos-de-prova preparados conforme explicado no item 2.4 com os cp's moldados como referência, de acordo com a NBR 5738/2003, para resistência às idades de 3 e 28 dias. Assim, considera-se que o adesivo utilizado promoveu aderência satisfatória se valores de resistências dos cp's do referido adesivo alcançarem cerca de 90% ou mais dos valores do concreto de referência, segundo Kriegh (1976) *apud*. Garcia & Clímaco (2001). Nesta análise, o autor supracitado acredita que para tais valores a resistência de adesão é satisfatória e a ruptura ocorre de modo monolítico, ou seja, o substrato, o sistema de aderência e o concreto novo, similar ao substrato comportam-se como um único material. Deste modo, considera-se que a aderência na junta é maior que a tensão de ruptura no concreto. Este critério pareceu ser bem razoável, visto que, devido à fragilidade das bordas dos espécimes, uma parte considerável da superfície do plano inclinado dos cp's do concreto do substrato, não foi tratada com a escarificação, não influenciando no travamento físico/mecânico entre os materiais. A figura 18 exemplifica a situação das superfícies de adesão dos cp's após a limpeza e a escarificação.

Assim, fez-se uso destes dados para analisar a eficiência das pontes de aderência utilizadas. A Tabela 20 apresenta os valores destes dados.

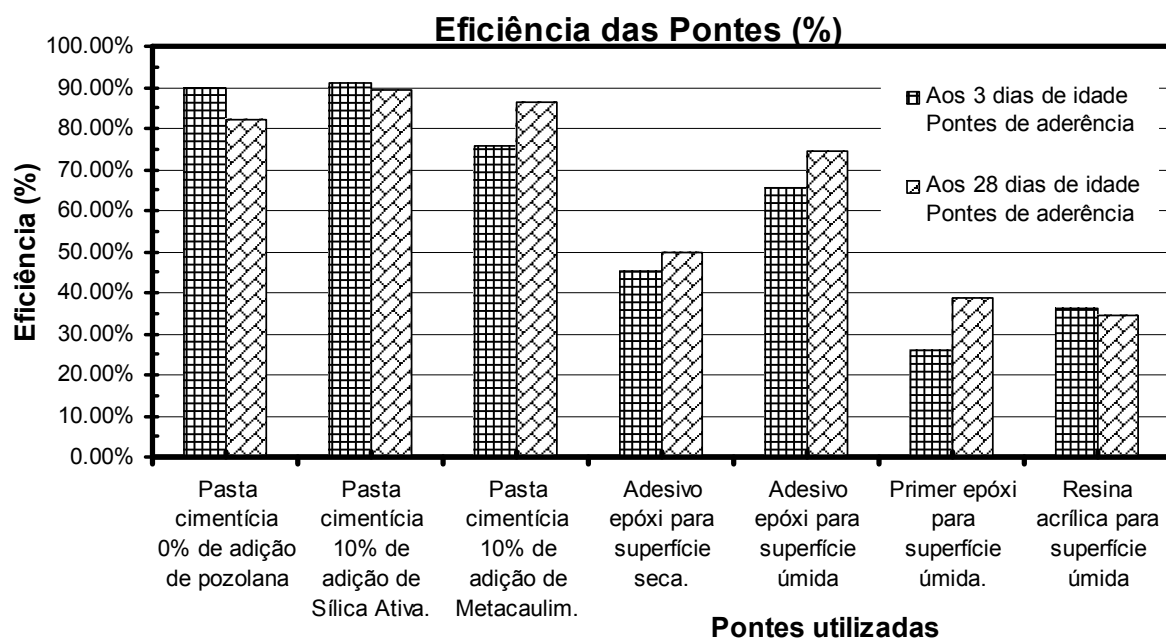
**Tabela 20** – Eficiência dos materiais ensaiados em relação ao concreto novo, de referência.

| MATERIAIS UTILIZADOS                            | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS ADESIVOS EM<br>RELAÇÃO À REFERÊNCIA (%) |                |                      |                |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|----------------|
|                                                 | 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       | 89.89%                                                               | <b>100.00%</b> | 82.14%               | <b>100.00%</b> |
| Pasta cimentícia 10% de adição de Sílica Ativa. | <b>90.88%</b>                                                        |                | <b>89.56%</b>        |                |
| Pasta cimentícia 10% de adição de Metacaulim.   | 75.85%                                                               |                | 86.59%               |                |
| Adesivo epóxi para superfície seca.             | 44.99%                                                               |                | 49.90%               |                |
| Adesivo epóxi para superfície úmida             | 65.45%                                                               |                | 74.47%               |                |
| Primer epóxi para superfície úmida.             | 26.09%                                                               |                | 38.56%               |                |
| Resina acrílica para superfície úmida           | 36.31%                                                               |                | 34.56%               |                |

De acordo com a Tabela 20, nota-se que as pastas cimentícias alcançaram altos valores de eficiência (em porcentagem). Aos 3 dias, o melhor desempenho obtido foi conseguido pela pasta cimentícia adicionada com 10% de sílica ativa por peso de cimento, com cerca de 91% da resistência de referência. Em seguida a pasta sem adição apresentou valor de eficiência bem próximo, alcançando cerca de 90%. Como dito anteriormente, a pasta com adição de metacaulim obteve valores de resistência aos 3 dias baixos, quando comparada às outras duas pastas cimentícias. Contudo, o seu desempenho foi superior a todos os materiais ditos industrializados. Dentre estes, o melhor desempenho registrado foi o do adesivo epóxi para aplicação em superfícies úmidas, com média de resistência aos 3 dias de cerca de 65% da resistência do concreto do substrato, de referência. A seguir, destaca-se o desempenho do adesivo epóxi para superfícies secas, com eficiência em torno de 45%. Estes valores, contudo, são considerados insatisfatórios pelo critério de 90% de eficiência estabelecido anteriormente. O pior desempenho foi conseguido pelo *primer* epóxi para superfícies úmidas, com apenas 26%, aproximadamente.

Aos 28 dias de idade percebe-se uma alternância de desempenhos. Enquanto a pasta com sílica ativa manteve o melhor desempenho, cerca de 90% – embora com uma pequena redução na sua eficiência, consequência do maior aumento de resistência do concreto de referência em relação ao aumento da mesma propriedade nos cp's colados com a referida pasta – o grande incremento de resistência dos cp's colados com pasta cimentícia adicionada com metacaulim proporcionou um aumento na eficiência do material em relação às outras pastas cimentícias, o valor obtido foi de aproximadamente 87%, enquanto que a pasta cimentícia sem adição diminuiu a sua eficiência para patamares de 82%. Quanto aos adesivos industrializados, o adesivo epóxi para superfícies úmidas continuou com o maior valor de eficiência, em torno de 75%, o adesivo epóxi para superfícies secas obteve o segundo melhor desempenho, cerca de 50%. Quanto ao *primer* epóxi para superfícies úmidas e a resina acrílica para superfícies úmidas, a ordem de desempenho entre elas foi modificada, de forma que a resina epóxi para superfícies úmidas apresentou eficiência superior à resina acrílica porque esta apresentou ganho de resistência irrisório, tendo inclusive o valor da sua eficiência reduzido.

A figura 40 ilustra a eficiência das pontes utilizadas, para as idades de 3 e 28 dias.



**figura 40** – Comparação das resistências dos cp's colados com os do concreto de referência, dada em porcentagem, para as idades de 3 e 28 dias (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

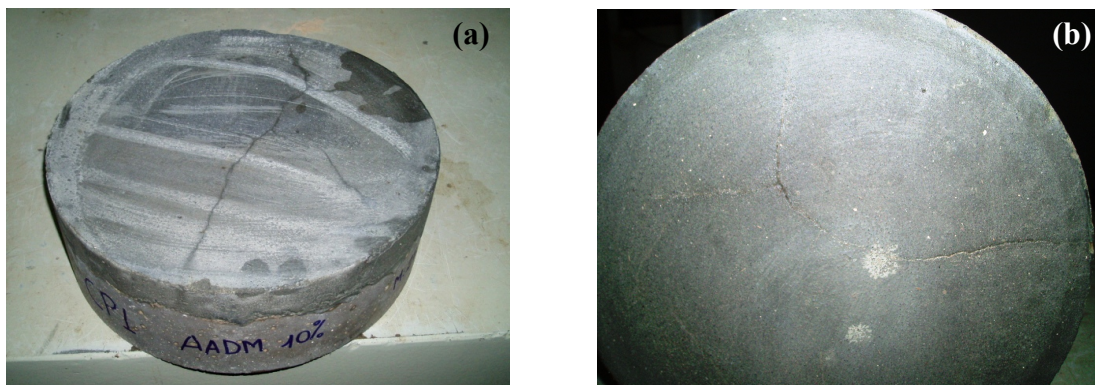
Analisando a figura 40 pode-se perceber que as resistências das pastas cimentícias foram bastante superiores às dos materiais industrializados, exceto para o adesivo epóxi indicado para aplicação em superfícies úmidas, que obteve valores de eficiência em torno de 26% e 15% inferiores aos da pasta com sílica ativa, cujas eficiências foram as melhores aos 3 e 28 dias, respectivamente. Ainda de acordo com a figura 40, nota-se que a pasta cimentícia sem adição de pozolana apresentou uma queda na eficiência dos 3 aos 28 dias, motivada pela queda da resistência média da pasta. A pasta com sílica e a resina acrílica para superfícies úmidas também apresentaram pequenas quedas. Porém, isto representa que a evolução das resistências dos referidos materiais foi inferior à evolução do concreto de referência, bem como o aumento da eficiência das pontes com o tempo reflete que o ganho de resistência destes materiais foi superior ao do concreto do substrato no período de 3 a 28 dias de idade.

#### 4.3 3ª ETAPA – ABRASÃO DOS REPAROS

Após a execução da metodologia para os ensaios de abrasão explanada anteriormente, verificou-se que esta apresentou pouca variabilidade visual, sendo confiável quanto ao seu uso como preparo de superfície.



Os procedimentos de aplicação dos reparos superficiais e profundos propiciaram acabamentos diferentes para cada tipo de reparo: enquanto as argamassas apresentaram aspecto liso e “desempenado”, os concretos apresentaram superfícies com saliências – devido aos agregados graúdos – e pouco trabalhadas. Ainda, a diferença entre o procedimento de armazenagem dos espécimes logo após a moldagem pode ter influenciado na qualidade superficial dos reparos. Assim, as argamassas, por terem sido imediatamente armazenadas em câmara úmida logo após a moldagem, podem ter tido uma superfície mais resistente à abrasão que os concretos, cujo procedimento de cura imediatamente após a moldagem foi realizado ao ar-livre. Esta diferença foi motivada pelas fissuras de retração encontradas nos corpos-de-prova completados com argamassa com 10% de metacaulim, mesmo adotando-se o procedimento relatado acima. Apesar da incidência das fissuras, estas não comprometeram o desempenho da AAD M10% quanto à abrasão, pois não apresentaram diferenças significativas em relação aos demais cp's. A figura 41 apresenta as fissuras de retração supracitadas.



**figura 41** – Cp's de AAD M10%: (a) CP 1, aos 3 dias, antes do início dos ensaios; (b) CP 6, aos 28 dias, após 12 horas de ensaio na máquina de abrasão hidráulica ASTM C 1138/97. Destaque para as fissuras de retração ocorridas na AAD M10% (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

Conforme preconiza a norma ASTM C 1138, o ensaio de abrasão pode ser efetuado em um período de apenas 24 horas (sendo efetuadas 2 medições), porém, caso deseje-se um desgaste mais acentuado, deve-se executar o ensaio pelo período normatizado de 72 horas (6 medições mais a inicial). Assim, este teste foi realizado até as 72 horas, haja vista que foram ensaiados materiais de alta resistência à abrasão. Os resultados deste ensaio são apresentados em função de sua altura média de desgaste, obtida segundo a norma supracitada.



### 4.3.1 Resistência à Abrasão aos 3 Dias.

A obtenção da resistência à abrasão aos 3 dias é importante à medida que o tempo de execução dos reparos é exíguo, em virtude dos vários transtornos sociais e econômicos causados pela parada de uma, ou mais turbinas geradoras de energia.

Assim, analisando os resultados de desgaste médios de 3 corpos-de-prova para cada material, à idade de 3 dias, nota-se uma clara diferença de desempenho da argamassa epóxi (AE) em relação aos demais compostos à base de cimento Portland (Tabela 21), com o aspecto de sua superfície apresentando pouco desgaste.

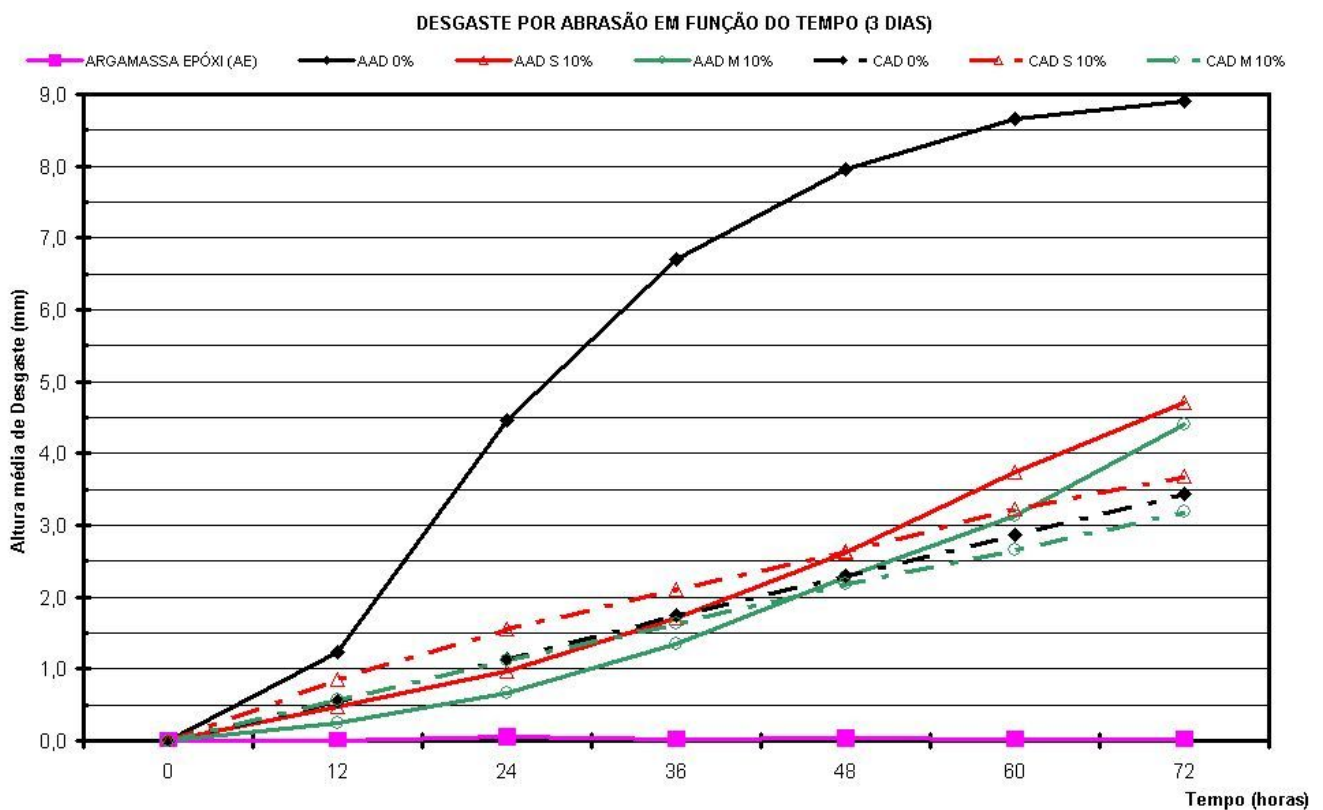
**Tabela 21** – Desgaste médio dos materiais de reparo aos 3 dias de idade, em volume desgastado e altura média de desgaste.

| MATERIAL                                                           |              | HORAS |       |       |       |       |       |              |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
|                                                                    |              | 0     | 12    | 24    | 36    | 48    | 60    | 72           |
| ARGAMASSA EPÓXI (AE)                                               | VLt (litros) | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,002        |
|                                                                    | ADAt (mm)    | 0,000 | 0,000 | 0,057 | 0,024 | 0,042 | 0,019 | <b>0,028</b> |
| ARGAMASSA CIMENTÍCIA SEM ADIÇÃO DE POZOLANA (AAD 0%)               | VLt (litros) | 0,000 | 0,087 | 0,315 | 0,474 | 0,563 | 0,612 | 0,630        |
|                                                                    | ADAt (mm)    | 0,000 | 1,226 | 4,456 | 6,710 | 7,960 | 8,653 | <b>8,913</b> |
| ARGAMASSA CIMENTÍCIA COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA (AAD S10%)         | VLt (litros) | 0,000 | 0,034 | 0,069 | 0,121 | 0,185 | 0,265 | 0,333        |
|                                                                    | ADAt (mm)    | 0,000 | 0,481 | 0,976 | 1,712 | 2,622 | 3,744 | <b>4,716</b> |
| ARGAMASSA CIMENTÍCIA COM ADIÇÃO DE METACAILIM (AAD M10%)           | VLt (litros) | 0,000 | 0,017 | 0,047 | 0,095 | 0,161 | 0,221 | 0,311        |
|                                                                    | ADAt (mm)    | 0,000 | 0,241 | 0,670 | 1,349 | 2,278 | 3,131 | <b>4,400</b> |
| CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO SEM ADIÇÃO DE POZOLANA (CAD 0%)        | VLt (litros) | 0,000 | 0,039 | 0,081 | 0,123 | 0,162 | 0,203 | 0,243        |
|                                                                    | ADAt (mm)    | 0,000 | 0,556 | 1,146 | 1,740 | 2,292 | 2,867 | <b>3,433</b> |
| CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA (CAD S 10%) | VLt (litros) | 0,000 | 0,061 | 0,110 | 0,149 | 0,186 | 0,228 | 0,260        |
|                                                                    | ADAt (mm)    | 0,000 | 0,863 | 1,556 | 2,108 | 2,631 | 3,226 | <b>3,683</b> |
| CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE METACAILIM (CAD M 10%)   | VLt (litros) | 0,000 | 0,040 | 0,079 | 0,116 | 0,155 | 0,188 | 0,225        |
|                                                                    | ADAt (mm)    | 0,000 | 0,561 | 1,113 | 1,641 | 2,188 | 2,660 | <b>3,188</b> |

Ainda avaliando o desempenho geral dos materiais, percebe-se que a AAD 0% apresentou um desgaste significativamente maior que os demais já nas primeiras horas de ensaio. Isto vai de encontro ao ocorrido com a resistência à compressão axial, na qual foi verificada uma resistência compatível com as obtidas pelas argamassas similares (AAD S10%

e AAD M10%). Deste modo, justifica-se o ocorrido apenas por deficiência no preparo do material, devido a problemas nos equipamentos de mistura, que podem ter acarretado mudanças no traço original da argamassa, conduzindo, possivelmente, a uma maior relação a/c desta, diminuindo a sua resistência à compressão e, conseqüentemente, o seu desempenho quanto à abrasão. Por conta dos problemas ocorridos, foram moldados apenas os cp's de 300x100 mm de abrasão, sem nenhum espécime de 50x100mm como controle para o ensaio de compressão axial. Apesar desses imbróglis, decidiu-se continuar com os procedimentos seguintes, pois a consistência da argamassa de referência (AAD 0%) era semelhante à obtida em ensaios prévios e às obtidas pelas argamassas com pozolanas.

A figura 42 apresenta a evolução dos desgastes médios de todos os materiais de reparo em função do tempo, para as idades de 3 dias:



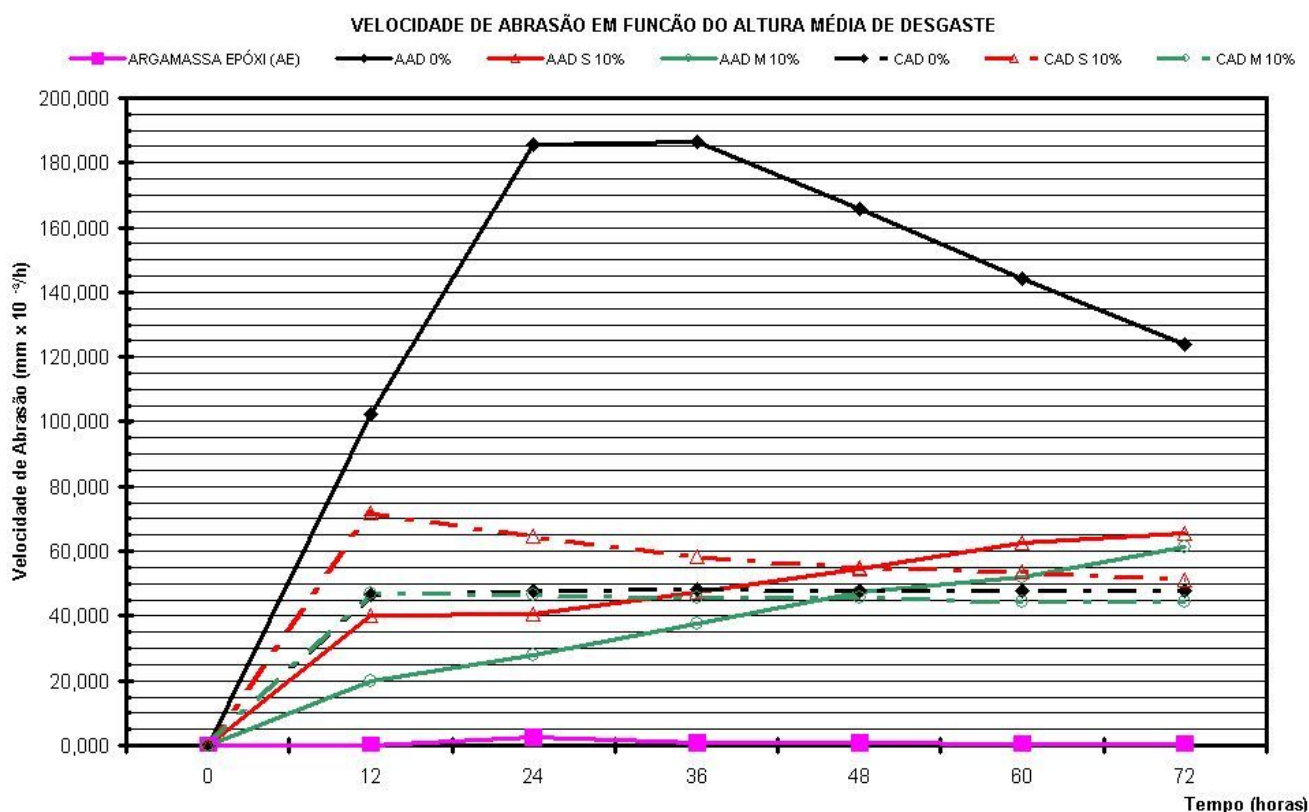
**figura 42** – Evolução do desgaste médio dos materiais de reparo à idade de 3 dias. Destaque para as argamassas (linhas cheias) AAD 0%, com um desempenho muito aquém do esperado e a AE, que apresentou um excelente desempenho à abrasão, apresentando superfície quase intacta visualmente (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

De acordo com a figura 42, nota-se claramente o desgaste acentuado da AAD 0% em relação os demais materiais, conforme mencionado anteriormente. Ainda, pode-se constatar

que, para os 3 dias, o desgaste final dos concretos foi menor que o das argamassas. Justifica-se isto por dois motivos: o primeiro se refere às resistências à compressão aos 3 e 7 dias dos concretos serem bastante superiores – em torno de 36% aos 3 dias e 43% aos 7 dias, em média – às resistências das argamassas, nos mesmos períodos, conforme verificado na figura 30; o segundo remete à maior resistência dos agregados graúdos ao desgaste por abrasão em comparação com a resistência das argamassas cimentícias, principalmente às primeiras idades, cujas argamassas ainda não desenvolveram boa parte das suas resistências finais. De posse dos dados de resistência à compressão axial e à abrasão, pode-se inferir que os fatores que mais influenciaram no desgaste dos materiais foram a presença ou ausência de agregados graúdos e a qualidade da superfície dos materiais.

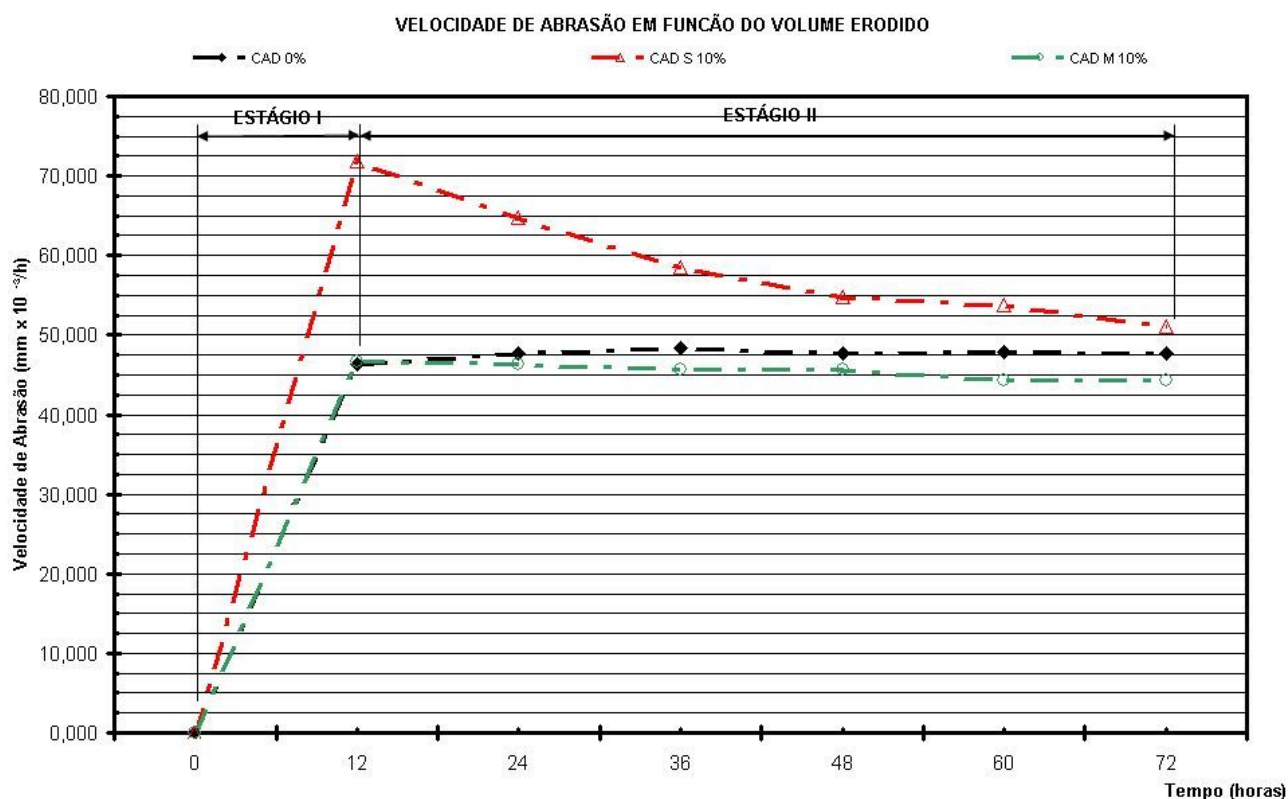
Para reforçar esta assertiva, basta uma comparação entre as argamassas cimentícias (exceto a AAD 0%) e os concretos, através da figura 42. Até as primeiras 36 horas de ensaio, os concretos apresentaram um desgaste maior que o ocorrido nas argamassas similares. Porém, a trajetória das curvas das argamassas (figura 42) foi oposta à dos concretos. Isto porque as superfícies dos reparos rasos foram melhor acabadas, em virtude da necessidade inerente ao procedimento de aplicação adotado, enquanto que os concretos tiveram um acabamento de superfície com qualidade inferior, sendo este apenas para regularizar as superfícies, pois se pretendia simular as condições de aplicação em superfícies verticais, por meio de fôrmas do tipo “boca-de-lobo”. Quando, logo após a 1ª medição (12 horas), o agregado graúdo começou a ser exposto pela ação abrasiva das esferas metálicas do ensaio ASTM C1138, o desgaste dos concretos passou a ser menor, ou similar ao anterior, diminuindo a sua aceleração ou mesmo anulando-a. Assim, a resistência à abrasão do agregado graúdo foi fator determinante na resistência final dos concretos de reparo.

A influência dos agregados também pode ser observada quando se analisa a velocidade de abrasão ( $V_a$ ) dos materiais de reparo. A figura 43 mostra a velocidade de desgaste dos reparos. Através da referida figura, observa-se que a velocidade de abrasão das argamassas cimentícias (exceto a AAD 0%) aumenta, grosso modo, linearmente, isto é, o desgaste destas argamassas é mais rápido quanto mais desgastadas elas estão. A razão deste comportamento vem do surgimento de trilhas na superfície (topo) dos cp's de argamassas, principalmente. Tais trilhas acentuaram o desgaste, pois direcionaram a ação abrasiva das esferas de aço em apenas uma determinada área da superfície dos espécimes.

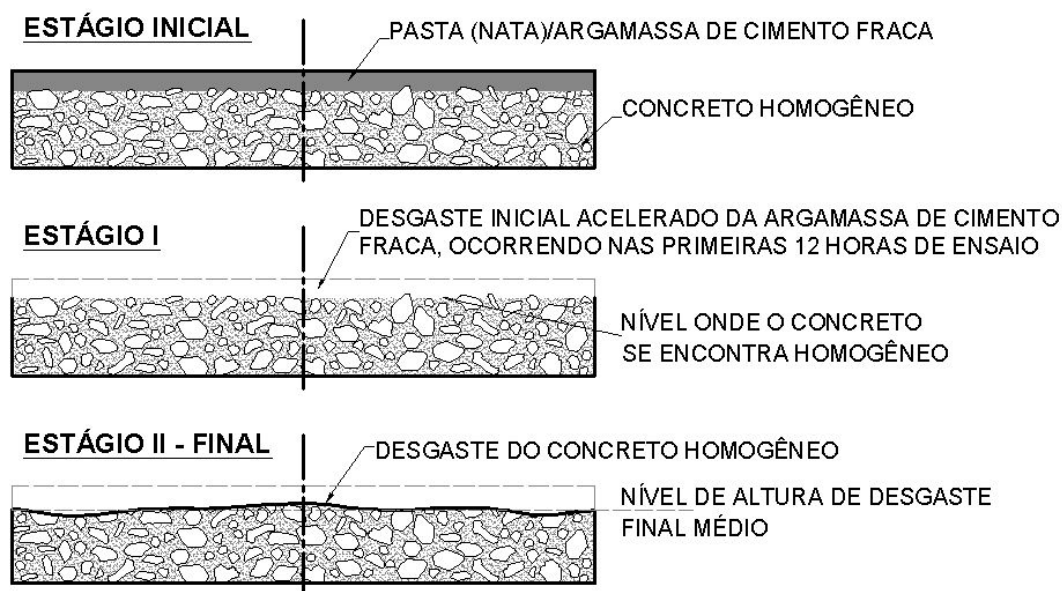


**figura 43** – Velocidade média de desgaste dos compostos de reparo aos 3 dias, em micrometros por hora, evidenciando, de maneira geral, uma estabilização da velocidade de desgaste dos concretos a partir de 12 horas e ensaio, enquanto as argamassas presenciaram um acréscimo nas suas velocidades de desgaste a partir do mesmo período de tempo (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

Quanto aos concretos, diferentemente das argamassas, percebe-se que a velocidade de abrasão, após a 12<sup>a</sup> hora, estabiliza-se e mantém-se no mesmo patamar até o final do ensaio, conforme destacado na figura 44. A este fato se atribui a maior resistência do agregado gráudo à abrasão, haja vista que nas 12 primeiras horas de ensaio, em geral, a velocidade de desgaste dos concretos foi semelhante às das argamassas e, já neste período, notou-se o surgimento dos agregados gráudos na superfície superior dos reparos. Assim, percebe-se que a velocidade de desgaste dos concretos é função, primeiramente, da resistência da camada superficial ao desgaste, que por sua vez é influenciada pela dosagem do concreto, exsudação e pela qualidade do acabamento da superfície; em seguida, após o rápido desgaste desta camada inicial, mais fraca devido ao excesso de água exsudada, o fator mais importante no desgaste passou a ser a presença do agregado gráudo, que se apresentava, agora, exposto ao desgaste. A figura 45 ilustra os dois estágios de desgaste.



**figura 44** – Velocidade de abrasão dos concretos à idade de 3 dias, em  $\text{mm} \times 10^{-3}/\text{h}$ . Destaque para a identificação dos dois estágios de desgaste (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).



**figura 45** – Corte esquemático dos cp's de concreto submetidos à abrasão hidráulica, mostrando os dois estágios (I e II) de desgaste (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

O desgaste do concreto homogêneo ocorreu a uma velocidade constante, como resultado da sua melhor qualidade e da maior resistência à abrasão dos agregados graúdos. No caso

específico d CAD S10%, notou-se claramente um pico na velocidade de abrasão ( $V_a$ ) às 12 horas de ensaio, sendo esta reduzida gradativamente no decorrer do teste. Isto corrobora com os resultados obtidos nos ensaio de resistência à compressão axial, nos quais o concreto com adição de sílica obteve a menor média de resistências dentre os concretos estudados. Outra hipótese para o relativo baixo desempenho do CAD S10% à abrasão aos 3 dias de idade é a velocidade da reação pozolânica dos silicatos constituintes da sílica ativa, a qual é lenta quando comparada com a velocidade de reação dos aluminatos do MCAR. Ambas as reações supracitadas só ocorrem após a hidratação do cimento Portland.

No APÊNDICE F, encontram-se as análises estatísticas de variância (ANOVA) de fator único, sendo separados os vários fatores intervenientes neste ensaio. Através desta análise, pôde-se inferir que não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias finais dos concretos de reparo utilizados, aos 3 dias, conforme pode ser verificado na figura 42. Isto pode ser explicado pelo uso de mesmos agregados e dosagem para os três concretos de reparo. A inclusão de pozolanas altamente reativas no concreto provou não ser tão importante quanto a resistência à abrasão dos agregados grãos, uma vez que não existiram diferenças significativas entre os reparos profundos. Estes resultados vão ao encontro do obtido por Marchante; Rosário e Braga (1983), nos quais o uso de agregados grãos com maior resistência à abrasão diminuiu o desgaste. A figura 46 ilustra os cp's mais desgastados de cada um dos três concretos utilizados como reparos.

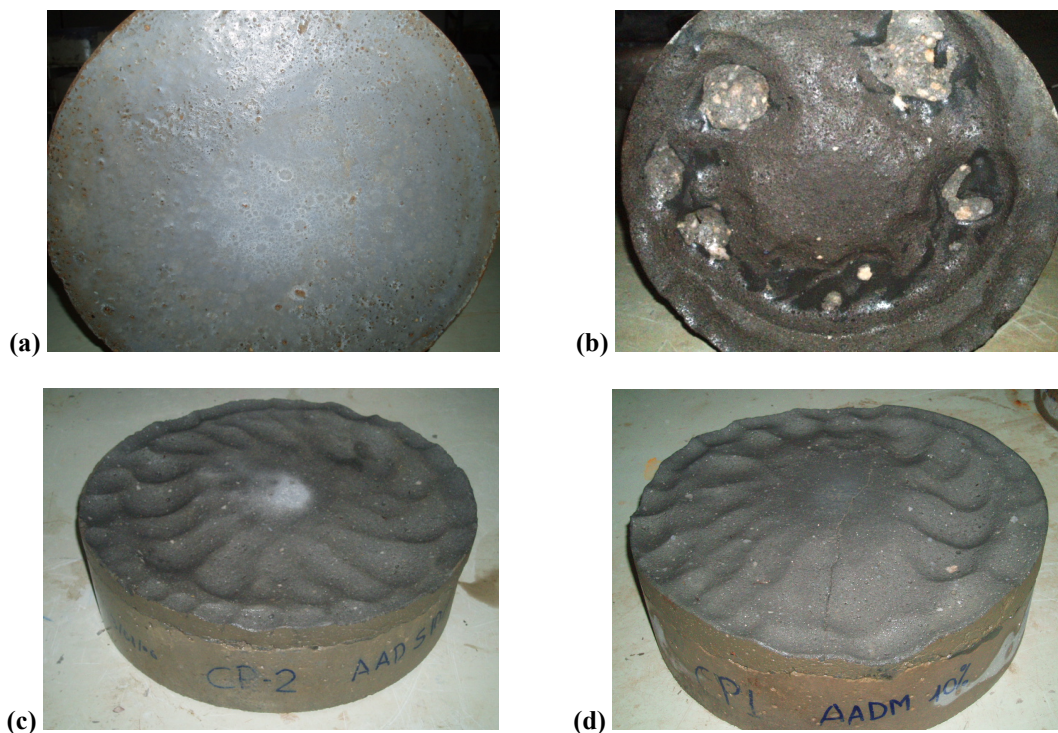


**figura 46** – Aspecto final (após 72 horas de ensaio) dos espécimes de concreto de reparo: (a) CAD 0%; (b) CAD S10%; (c) CAD M10%. Não há diferença estatística entre a média destes materiais (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

Também podem ser verificadas claramente através da figura 42 que as médias entre as argamassas AE e AAD 0% foram bastante diferentes entre si e entre as demais. A fim de se avaliar a influência das pozolanas na abrasão das argamassas, não foi estatisticamente constatada diferença significativa entre a média final das argamassas AAD S10% e AAD M10%, para a idade de três dias. Apesar disto, houve diferenças significativas entre estas e



aquelas primeiras, indicando que o uso de pozolanas realmente melhorou o desempenho das argamassas cimentícias à abrasão, quando comparadas com a AAD 0%, porém não tanto para compararem-se à argamassa epóxi. Através da figura 47 (a, b, c e d), pode-se avaliar o aspecto final dos espécimes de reparos superficiais mais desgastados, para cada tipo de material.



**figura 47** – Aspecto dos cp's de argamassas mais desgastados ao final do ensaio: (a) AE; (b) AAD 0%; (c) AAD S10%; (d) AAD M10%. Detalhe para o pequeno desgaste da argamassa epóxi e do exagerado desgaste da AAD 0%, que, logo nas primeiras 36 horas de ensaio, já expunha o concreto do substrato (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

Comparando o desempenho dos concretos e argamassas cimentícias de reparo os 3 dias, pode-se deduzir que os concretos apresentaram melhor desempenho à abrasão que as argamassas, quantitativamente, com diferença um pouco maior que 1,0 mm de desgaste, entre os materiais com adições de pozolanas (APÊNDICE F). Tal diferença não é significativa estatisticamente. Todavia, em virtude do exagerado desgaste desenvolvido pela AAD 0%, as médias entre esta e o CAD 0% foram diferentes. De acordo com os resultados finais obtidos pelos materiais de reparo de base cimentícia, sugere-se, a princípio, que a adição das pozolanas altamente reativas melhorou bastante o desempenho das argamassas de reparo à abrasão, pois estas apresentaram desempenhos similares aos obtidos pelos concretos, de maneira geral. Contudo, a influência da adição destes compostos cimentícios deve ser ratificada através da análise dos resultados obtidos pelos respectivos materiais de reparo aos 28 dias.

### 4.3.2 Resistência à Abrasão aos 28 Dias.

A obtenção da resistência à abrasão aos 28 dias é de extrema importância, pois a esta idade considera-se que os concretos ou argamassas cimentícias apresentem as suas resistências consideradas como finais, para efeitos de projeto. Por conta disto, a resistência à esta idade servirá como um padrão para o desempenho desses materiais ao longo de suas vidas úteis.

Deste modo, foram realizados os ensaios de abrasão de acordo com a norma ASTM C1138. Os resultados médios de 3 espécimes obtidos através deste ensaio, para cada tipo de material estão dispostos na Tabela 22:

**Tabela 22** – Desgaste médio dos materiais de reparo aos 28 dias de idade, em volume desgastado e altura média de desgaste.

| MATERIAL                                                                     |                 | HORAS |       |       |       |       |       |              |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
|                                                                              |                 | 0     | 12    | 24    | 36    | 48    | 60    | 72           |
| ARGAMASSA EPÓXI<br>(AE)                                                      | VLt<br>(litros) | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,017 | 0,001 | 0,008 | 0,010        |
|                                                                              | ADAt<br>(mm)    | 0,000 | 0,005 | 0,014 | 0,245 | 0,009 | 0,113 | <b>0,146</b> |
| ARGAMASSA<br>CIMENTÍCIA SEM<br>ADIÇÃO DE<br>POZOLANA(AAD 0%)                 | VLt<br>(litros) | 0,000 | 0,041 | 0,085 | 0,163 | 0,237 | 0,292 | 0,377        |
|                                                                              | ADAt<br>(mm)    | 0,000 | 0,585 | 1,203 | 2,306 | 3,348 | 4,136 | <b>5,329</b> |
| ARGAMASSA<br>CIMENTÍCIA COM<br>ADIÇÃO DE SÍLICA<br>ATIVA (AAD S10%)          | VLt<br>(litros) | 0,000 | 0,013 | 0,032 | 0,072 | 0,120 | 0,169 | 0,222        |
|                                                                              | ADAt<br>(mm)    | 0,000 | 0,184 | 0,453 | 1,019 | 1,702 | 2,396 | <b>3,145</b> |
| ARGAMASSA<br>CIMENTÍCIA COM<br>ADIÇÃO DE<br>METACAULIM<br>(AAD M10%)         | VLt<br>(litros) | 0,000 | 0,024 | 0,049 | 0,091 | 0,141 | 0,203 | 0,280        |
|                                                                              | ADAt<br>(mm)    | 0,000 | 0,344 | 0,698 | 1,283 | 1,990 | 2,867 | <b>3,966</b> |
| CONCRETO DE ALTO<br>DESEMPENHO SEM<br>ADIÇÃO DE<br>POZOLANA(CAD 0%)          | VLt<br>(litros) | 0,000 | 0,011 | 0,050 | 0,090 | 0,137 | 0,180 | 0,223        |
|                                                                              | ADAt<br>(mm)    | 0,000 | 0,160 | 0,707 | 1,269 | 1,943 | 2,542 | <b>3,155</b> |
| CONCRETO DE ALTO<br>DESEMPENHO COM<br>ADIÇÃO DE SÍLICA<br>ATIVA (CAD S 10%)  | VLt<br>(litros) | 0,000 | 0,035 | 0,071 | 0,107 | 0,144 | 0,182 | 0,212        |
|                                                                              | ADAt<br>(mm)    | 0,000 | 0,490 | 1,004 | 1,518 | 2,032 | 2,570 | <b>3,004</b> |
| CONCRETO DE ALTO<br>DESEMPENHO COM<br>ADIÇÃO DE<br>METACAULIM<br>(CAD M 10%) | VLt<br>(litros) | 0,000 | 0,026 | 0,067 | 0,106 | 0,152 | 0,198 | 0,247        |
|                                                                              | ADAt<br>(mm)    | 0,000 | 0,368 | 0,953 | 1,504 | 2,155 | 2,806 | <b>3,494</b> |

Confirmando o ocorrido aos 3 dias, a AAD 0% apresentou o maior desgaste por abrasão, do início ao final do ensaio, porém, o seu desempenho melhorou significativamente, para um



valor em torno de 60% do desgaste final médio obtido aos 3 dias. No entanto, a comparação simples entre os valores obtidos pela AAD 0% aos 3 e 28 dias foi prejudicada pelos problemas ocorridos na mistura desta. Na ocasião, foram moldados apenas três corpos-de-prova de 300x100 mm de abrasão. Tais cp's foram ensaiados aos 3 dias. Para a determinação da resistência ao desgaste da argamassa cimentícia sem adição aos 28 dias, foram produzidos três novos espécimes deste reparo, com as devidas precauções, de modo que o problema ocorrido anteriormente fora contornado. Logo, para estes últimos cp's foram realizados ensaios de controle através da resistência à compressão axial, sendo que os resultados destes foram compatíveis com os obtidos na 1ª etapa da pesquisa.

Enquanto isso, as argamassas com adição de pozolanas aumentaram as suas resistências ao desgaste, quando comparadas com os resultados obtidos aos 3 dias. A AAD S10% apresentou o melhor desempenho dentre as argamassas ao final do ensaio, sendo que a sua resistência média ao desgaste foi diferente estatisticamente da AAD 0% e igual à sua semelhante com adição de MCAR. Estas duas últimas não apresentaram diferenças significativas entre si ao final do ensaio conforme os resultados obtidos aos 3 dias. Este fato comprova que as pozolanas MCAR e sílica ativa obtiveram desempenhos equiparados, tanto aos 3 quanto aos 28 dias. Entretanto, a diferença absoluta das médias de ambas aumentou dos 3 aos 28 dias, de 0,315 mm a favor da argamassa com adição de metacaulim para 0,820mm a favor da sílica ativa. Considerando-se que a diferença mínima significativa (d.m.s.) para as médias das argamassas aos 28 dias é de 1,557 mm (APÊNDICE F) e que houve diferença significativa estatisticamente entre a AAD 0% e a AAD S10%, pode-se considerar que, aos 28 dias, esta última argamassa seria mais indicada contra os efeitos da abrasão hidráulica.

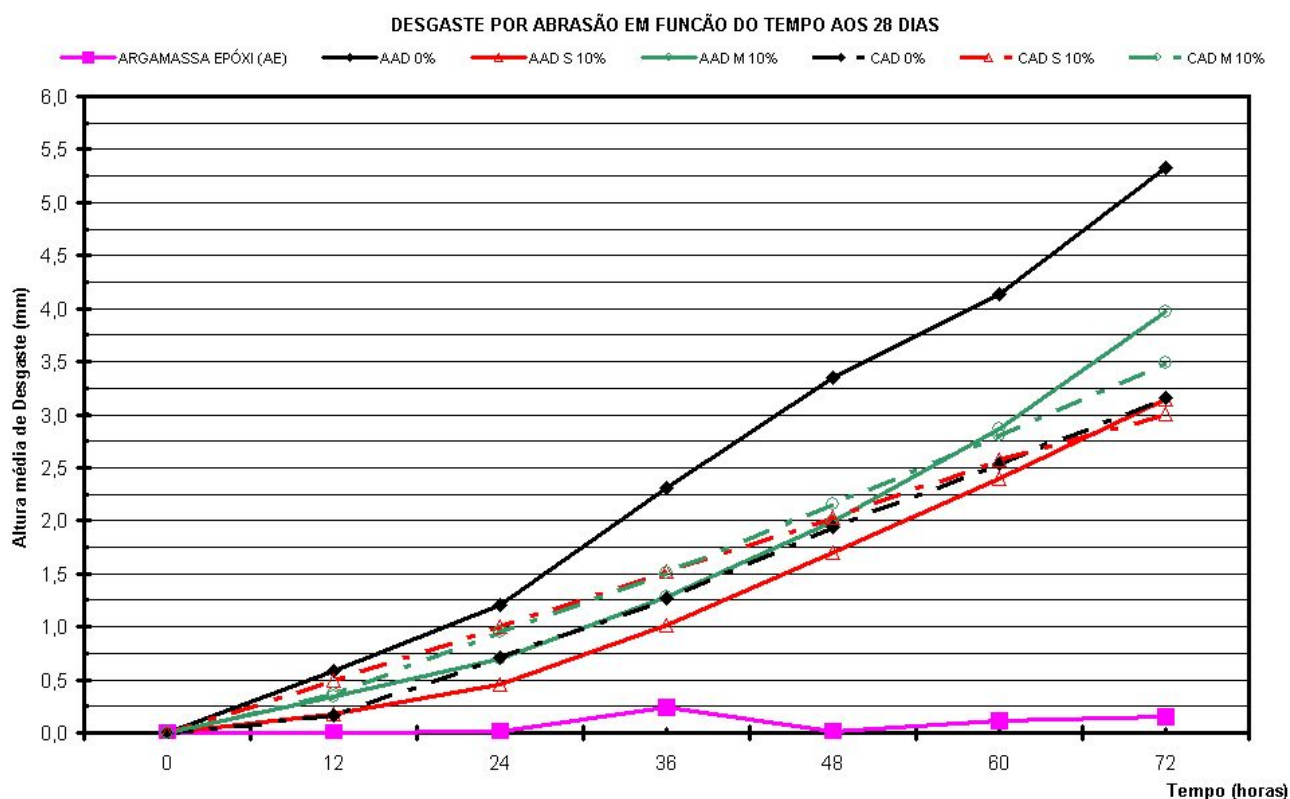
Complementando os resultados das argamassas, a AE obteve excelente resistência à abrasão, semelhante à obtida aos três dias. O aumento do desgaste desta argamassa dos três aos vinte oito dias poderia suscitar que a argamassa epóxi, que, assim como todos os outros materiais de reparo, foi curada através de imersão em água, apresentasse uma queda de rendimento devido às eventuais perdas em suas propriedades mecânicas, conforme mencionado por Bowditch (1996) e Frigione; Aiello e Naddeo (2005) entre outros. Todavia, o desgaste experimentado pela argamassa epóxi em ambas as idades foi tão reduzido que não se pode creditar àquela hipótese a variação negativa da resistência à abrasão da AE. Provavelmente, esta variação foi observada pela imprecisão dos equipamentos para medição da ordem de grandeza do desgaste apresentado pela argamassa, bem como pelas próprias variações inerentes ao ensaio.

Contudo, o desempenho excepcional da argamassa epóxi não a classifica como a solução ideal para os reparos rasos, uma vez que outros fatores devem ser considerados, como exposto nos Capítulos 1 e 2 desta dissertação. Um dos fatores negativos desta argamassa é que, apesar dela apresentar uma consistência pastosa, tal qual preconiza o seu respectivo fabricante, ela não apresentou tixotropia suficiente para aderir à superfície encharcada do substrato, quando da sua aplicação para os ensaios de abrasão (figura 48). Esta dificuldade pode inviabilizar o uso da AE em substratos úmidos na vertical. Embora não seja escopo deste trabalho, há de se considerar o custo da argamassa epóxi, muito superior aos custos das argamassas cimentícias.



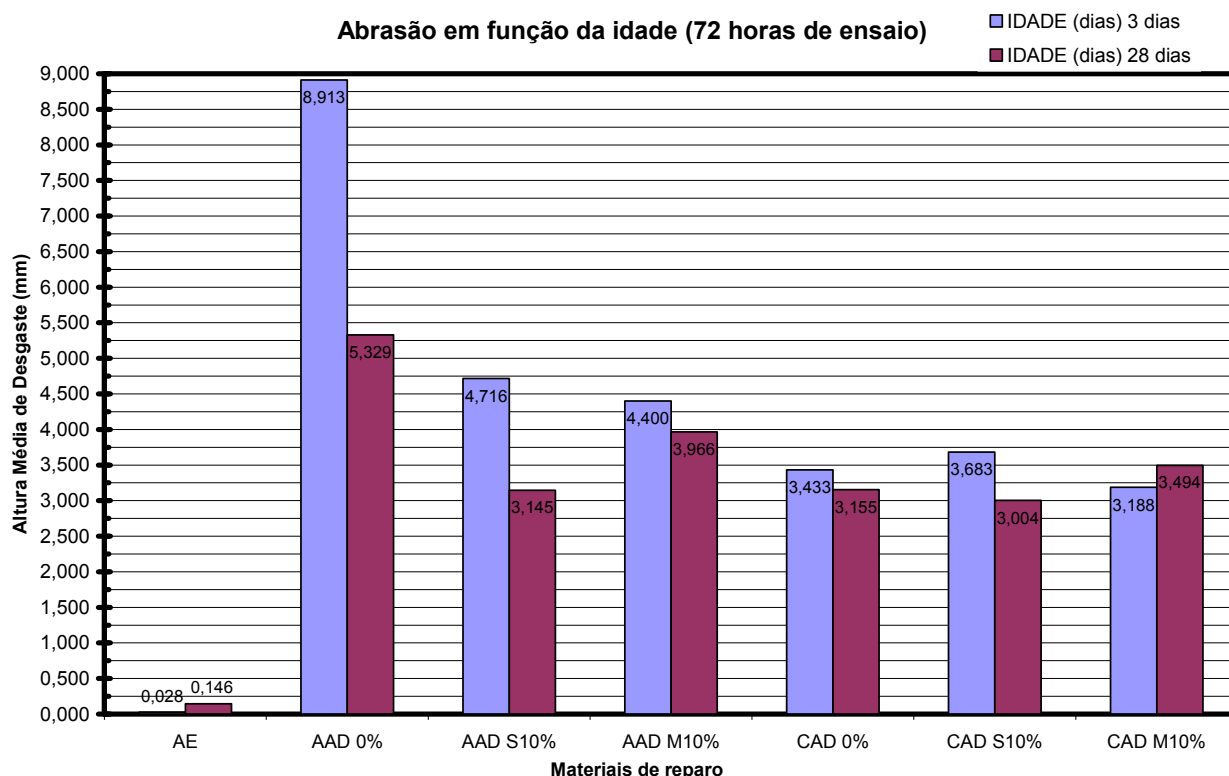
**figura 48** – Aplicação da AE em substrato úmido e inclinado, na tentativa de simular as condições de aplicação da argamassa em superfícies verticais. Nota-se que a AE escorre na superfície do cp de abrasão, podendo inviabilizar o seu uso em superfícies não-horizontais (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

A figura 49 mostra a evolução do desgaste por abrasão hidráulica dos materiais de reparo para a idade de 28 dias:



**figura 49** – Evolução dos desgastes médios dos materiais de reparo à idade de 28 dias. Confirmando os resultados obtidos aos 3 dias, a AAD 0% apresentou o maior desgaste entre todos os materiais. Mais uma vez, a AE apresentou desgaste irrisório (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

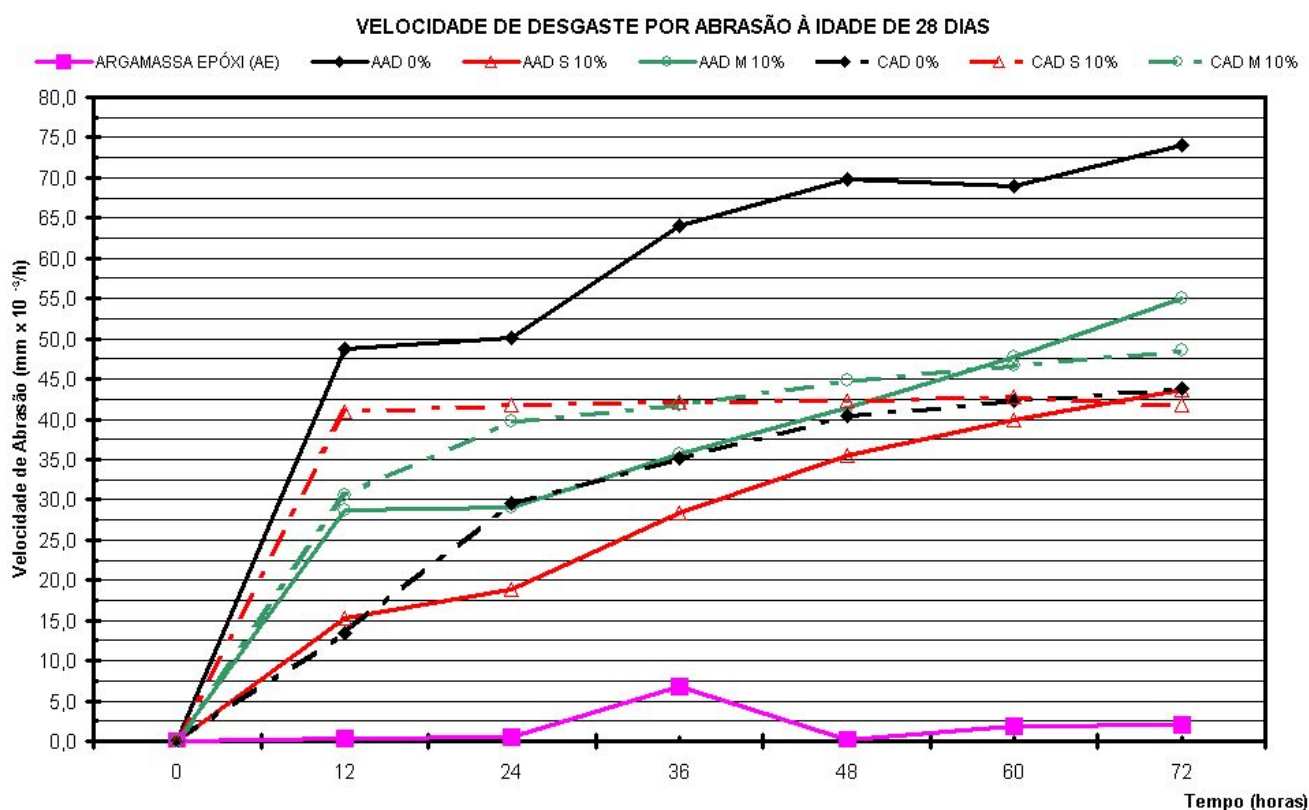
Da figura 49 percebe-se que desde o início do ensaio a AAD 0% apresentava o maior desgaste de todos os materiais e reparo, porém a diferença experimentada aos 3 dias, dela para com as demais diminuiu. A resistência à abrasão das argamassas com adições pozolânicas aumentou com a idade porque a resistência à compressão axial de todas as argamassas evoluiu cerca de 40% dos 3 aos 28 dias. Assim, como a resistência da abrasão das argamassas é essencialmente dependente da resistência da matriz cimentícia, esse aumento foi extremamente responsável pela elevação no desempenho das argamassas cimentícias. Quanto ao efeito das pozolanas, pode-se dizer que foi benéfico para a resistência à abrasão das argamassas, embora este benefício tenha sido bastante reduzido. Pode-se perceber através da figura 50 que o desempenho médio dos materiais de reparo após 72 horas de ensaio, melhorou – exceto para o CAD M10% – dos 3 aos 28 dias.



**figura 50** – Desempenho médio final dos materiais de reparo aos 3 e 28 dias, indicando uma evolução geral no desempenho dos materiais ao longo do tempo.

De acordo com o APÊNDICE F, a influência das pozolanas foi mais notada nas argamassas, que apresentaram alguma diferença entre suas médias e conseguiram alcançar o mesmo nível de resistência ao desgaste obtido pelos concretos. De modo geral, os concretos apresentam maior resistência à abrasão que as argamassas, porque, primeiramente, os agregados graúdos possuem boa resistência à abrasão e segundo porque materiais com agregados de maior tamanho apresentam melhor desempenho à abrasão devido à menor área superficial específica total dos seus grãos quando comparados aos agregados miúdos das argamassas. Para evitar que estes sejam retirados do compósito por abrasão, é necessário um teor de pasta maior em virtude da maior área superficial total destes agregados, consequentemente aumentando a zona de transição total. Neste sentido, as pozolanas são benéficas pois melhoram a zona de transição, diminuindo a sua espessura através dos efeitos *filler* e pozolânico e proporcionam um ligeiro aumento de rendimento da pasta (maior teor de pasta), por conta do acréscimo de volume gerado com as suas incorporações como substituição do cimento, uma vez que as suas massas específicas são menores que a do cimento.

A respeito da velocidade de abrasão das argamassas de reparo, estas se comportaram de modo semelhante ao observado aos 3 dias, sem a presença dos dois estágios característicos dos concretos, denotando uma aceleração positiva no decorrer do ensaio (figura 51). Como aos 3 dias, a ausência de agregados graúdos de menor granulometria – que tornam o desgaste mais uniforme (NEVILLE, 1997) – e o surgimento de trilhas contribuíram para este comportamento.



**figura 51** – Velocidade de abrasão para os materiais de reparo aos 28 dias. Destaque para o comportamento das argamassas, que, diferentemente dos concretos, apresentou aumento na sua velocidade (aceleração positiva); os concretos, no entanto, tenderam a apresentar 2 estágios de desgaste como aos 3 dias, porém, o aumento na resistência das suas “camadas fracas” (estágio 1) mitigou, de maneira geral, a identificação dos estágios mencionados acima (FONTE: José Rodrigo Santana Pinho).

Há mais um aspecto a se considerar, para a  $V_a$  das argamassas, no sentido da aceleração do desgaste das argamassas até a 1ª medição (12 horas). Neste período, constata-se, de maneira geral, uma aceleração superior às obtidas no prosseguimento dos ensaios. Justifica-se este fato pela presença da camada superficial de nata, mais fraca que o interior dos reparos. Além disso, o progresso na resistência à compressão das argamassas fez aumentar não só a resistência à abrasão das argamassas internamente, mas também a resistência da camada de nata superficial, que levou a um menor desgaste das argamassas às primeiras 12 horas.

Quanto aos concretos, o desempenho à abrasão melhorou com a idade para os concretos CAD 0% e CAD S10% e piorou para o CAD M10%. O incremento na resistência ao desgaste dos dois primeiros é explicado pelo aumento nas respectivas resistências à compressão axial e o decréscimo experimentado pelo último vai de encontro aos seus resultados de resistência à compressão alcançados, já que esta aumentou dos 3 aos 28 dias. Ainda assim, a comparação das médias dos concretos entre si, em função da idade e entre si mesmos aos 3 e aos 28 dias não foi diferente estatisticamente, comprovando que o fator mais influente na abrasão é a presença de agregados graúdos – resistentes à abrasão – e não a adição de pozolanas. Contudo, de maneira geral, a elevação da resistência da matriz cimentícia propiciou uma pequena queda na altura média de desgaste dos concretos estudados e a uma extinção no “pico” de velocidade de abrasão observado para o CAD S10% aos 3 dias, com conseqüente redução considerável da  $V_a$ . A melhoria das propriedades da matriz cimentícia nos concretos CAD 0%, principalmente, e CAD M10% conduziu-os a menores desgastes às 12 horas de ensaio, chegando a equiparar-se com os desgastes obtidos pelas respectivas argamassas no mesmo período.

Assim, para os concretos, a qualidade da camada superficial provou ser importantíssima para a velocidade de abrasão nos materiais. Apesar do bom desempenho do CAD M10% às 12 horas, a rigor, houve diferença significativa estatisticamente entre a média da velocidade obtida na 1ª medição e as médias obtidas a partir do período de 48 horas de ensaio (APÊNDICE G). Entretanto, as diferenças calculadas foram bem próximas à d.m.s. para esta série, podendo ser inferido que o referido material comportou-se de acordo com os dois estágios citados anteriormente. O concreto com adição de sílica ativa demonstrou claramente este comportamento, todavia, o CAD 0%, devido ao ótimo desempenho à abrasão nas primeiras doze horas, obteve diferenças significativas desde as 24 horas de ensaio.

Finalmente, conforme já mencionado anteriormente, não houve diferenças estatísticas significativas entre os tipos de concreto em quaisquer idades, apesar do desgaste ter diminuído mediante melhora nas propriedades mecânicas da matriz cimentícia. Para justificar o ínfimo acréscimo de resistência à abrasão dos CAD's com adições de pozolana em relação ao sem qualquer adição, pode-se inferir, através da hipótese de que foram utilizados, em conjunto, cimento ARI e uma baixa relação a/agl. (0,32) deste modo, após a rápida hidratação dos grãos do cimento, o efeito pozolânico foi prejudicado por não existirem mais umidade suficiente para o desencadeamento da reação pozolânica e espaços para a movimentação dos



íons das pozolanas. De uma maneira geral, os concretos apresentaram melhor resistência ao desgaste em relação às argamassas para ambas as idades.

A figura 52 mostra a situação dos cp's de reparos superficiais mais desgastados, para cada tipo de material. A figura 53 exhibe os espécimes de reparos profundos (concretos) que mais sofreram desgaste, ao final do ensaio.



**figura 52** – Espécimes de 300x100mm de argamassas que mais sofreram mais desgaste ao final do ensaio: à esquerda, os cp's ensaiados aos 28 dias e a direita aos 3; de cima para baixo: AE, AAD 0%; AAD S10% e AAD M10% (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).



**figura 53** – Espécimes de 300x100mm de concretos que mais sofreram mais desgaste ao final do ensaio. Acima: corpos-de-prova ensaiados aos 3 dias; abaixo: aos 28; da esquerda para a direita: CAD 0%, CAD S10% e CAD M10% (FOTO: José Rodrigo Santana Pinho).

## 5 Conclusões

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No intuito de reproduzir as condições de aplicação e ambientais encontradas na UHE de Curuá-Una, considera-se que foram obtidas, com certo êxito, condições semelhantes de umidade do substrato e ambientais, devido à cura em câmara úmida. Deste modo, espera-se ter executado a aplicação dos sistemas de reparo o mais fiel possível às condições impostas na referida usina hidrelétrica, para que esses sistemas fossem realmente avaliados quando da sua viabilidade de uso *in situ*.

As superfícies de concreto do tubo de sucção da usina hidrelétrica de Curuá-Una se apresentavam com níveis de deterioração medianos, localizados em suas paredes verticais e no teto, além de danos no piso. A localização dos danos poderia indicar que estaria ocorrendo o fenômeno de cavitação em conjunto com a abrasão hidráulica, porém, na análise das superfícies dos danos, observou-se que eles não apresentavam indícios de cavitação, pois ainda existiam diversos agregados graúdos que deveriam ser removidos pelo efeito da cavitação (NEVILLE, 1997). Assim, a localização das deteriorações demandava aos materiais de reparo superficiais propriedades especiais como elevada tixotropia e tempo de manuseio adequado para a aplicação em questão. Houve também danos mais profundos, que devem ser tratados com concreto. A tais materiais, recomenda-se que possuam elevada fluidez, para aplicação por gravidade (quando possível) ou injetados. De acordo com a metodologia proposta, danos localizados (com dimensão inferior a 1,0 m<sup>2</sup>) com profundidade de até 2,0 cm devem ser tratados com argamassas e deteriorações com profundidade superior devem ser tratadas com concreto contendo agregados com granulometria selecionada.

Após análise dos materiais de reparo utilizados, verificou-se que tanto as suas propriedades no estado fresco (coesão, tixotropia e fluidez) quanto no estado endurecido (resistência à compressão axial e à abrasão) foram adequadas para os diversos usos prováveis em superfícies de UHE's. Entretanto, deve-se atentar para a baixa tixotropia alcançada pela argamassa epóxi utilizada, o que pode prejudicar o seu emprego. Embora a AE tenha alcançado baixa resistência à compressão, o seu desempenho à abrasão foi notável, provando que, para os materiais poliméricos (epóxi), a resistência ao desgaste não sofre influência direta da resistência à compressão, como nas cerâmicas; ao invés disso, a estrutura das cadeias moleculares formada e a força de ligação entre suas moléculas são fatores preponderantes para a resistência à abrasão destes compostos.



Quanto aos adesivos, notou-se claramente um desempenho superior das pastas cimentícias em relação aos materiais ditos “industrializados”, a base de resinas epóxi e acrílica. Dentre as pastas cimentícias, a que obteve o maior desempenho quanto à aderência foi a pasta com adição de 10% de sílica ativa, aos 3 e 28 dias. Aos 3 dias a pasta cimentícia sem adição apresentou desempenho bem próximo ao obtido pela pasta com sílica, no entanto, o desenvolvimento de sua resistência dos 3 aos 28 dias foi aquém do conseguido pelo concreto de referência, reduzindo a sua eficiência. A pasta com metacaulim alcançou desempenho apenas razoável aos 3 dias, melhorando significativamente para os 28 dias, quando equiparou a sua eficiência com as outras duas pastas cimentícias. Com relação aos adesivos industrializados, os desempenhos, em geral, foram muito menores para os adesivos a base de resina acrílica, para o *primer* epóxi para superfícies úmidas e para o adesivo epóxi para superfícies secas, devido, principalmente, à condição de saturação da superfície no momento da aplicação. Ratificando a sua classificação (pelo fabricante) e contrariando as conclusões de Villalba *et al.*, (2002), o adesivo epóxi para superfícies úmidas alcançou o melhor desempenho dos ditos “industrializados”, com cerca de 75% da resistência do concreto de referência aos 28 dias de idade.

A respeito do procedimento de ensaio de avaliação da aderência destes adesivos, pode-se inferir que o mesmo foi satisfatório, haja vista que os adesivos puderam ser avaliados quanto às suas respectivas aplicações. Todavia, o uso de cp's cilíndricos de 10x20 cm (diâmetro x altura) gerou dificuldades para o preparo da superfície de contacto (plano inclinado) porque não foi possível o preparo de toda a superfície, pois o tratamento com escarificação mecânica nas bordas da superfície danificava o espécime. Portanto, só a parte central da área de contacto foi tratada. Este fato pode ter contribuído para a redução da eficiência das pontes de aderência estudadas, uma vez que o preparo das superfícies foi crucial para a resistência de aderência dos compostos. Ainda assim, os adesivos cimentícios apresentaram resistência satisfatória (em torno de 90%). Devido à manutenção de sua eficiência dos 3 aos 28 dias, a pasta cimentícia com adição de 10% de sílica ativa foi o adesivo que apresentou melhor desempenho dentre os ensaiados.

O procedimento realizado para preparar as superfícies dos cp's de abrasão para a aplicação dos reparos, utilizando a máquina de abrasão ASTM C 1138, foi considerado satisfatório, em virtude da pouca variabilidade de desgaste medida visualmente entre os corpos-de-prova, da praticidade e da produtividade da metodologia, além da disponibilidade dos equipamentos de abrasão. A aplicação das argamassas em espécimes inclinados serviu

para avaliar o emprego destas em superfícies verticais e o adensamento simples, por gravidade, dos concretos foi útil para a simulação de reparos profundos executados também em superfícies verticais por meio de fôrmas do tipo “boca-de-lobo”.

O desempenho geral dos concretos e argamassas cimentícias de reparo à abrasão foi, estatisticamente, igual, sendo que os concretos obtiveram desempenho pouco superior às argamassas em ambas as idades, porém, a evolução do desempenho das argamassas cimentícias dos 3 aos 28 dias foi superior ao dos concretos, devido à maior influência do ganho de resistência da matriz cimentícia durante este período. Os concretos foram pouco influenciados pela melhoria na resistência à abrasão da matriz cimentícia porque o fator mais importante foi a resistência ao desgaste dos seus agregados graúdos. Logo, a influência das adições pozolânicas e da idade na resistência à abrasão dos concretos foram aspectos secundários.

A velocidade de abrasão ( $V_a$ ) dos materiais de reparo foi bastante influenciada pelas propriedades das suas camadas superficiais. Em razão da maior exsudação dos concretos, a camada superficial destes apresentou menor resistência e, conseqüentemente, maior desgaste às primeiras 12 horas de ensaio do que o verificado pelas argamassas. No entanto, no decorrer do ensaio, as partículas de agregado graúdo de pequeno diâmetro (9,5 mm) propiciaram aos concretos um menor e mais uniforme desgaste em relação às argamassas, devido às suas maiores resistências à abrasão. Como não houve essa interferência dos agregados graúdos nas argamassas, surgiram trilhas que contribuíram para o aumento da  $V_a$  nos espécimes reparados com estes materiais.

A medição dos valores em altura e volume médios de desgaste é a mais indicada por eliminar as diferenças obtidas com a apresentação de dados em porcentagem de desgaste da massa total dos espécimes. Essas diferenças são motivadas pelas variações nas alturas e massas ocorridas entre os corpos-de-prova.

A efeito de sistematização, pode-se dizer que a divisão dos reparos em dois tipos segundo a profundidade do reparo foi adequada e que, considerando as estatísticas sobre o desempenho desses materiais à abrasão e, ainda sua disponibilidade, pode-se classificar como melhores reparos, em suas respectivas categorias, a argamassa cimentícia com adição de 10% de sílica (AAD S10%) e o concreto de alto desempenho sem adição de pozolana (CAD 0%), ambos colados ao substrato com a pasta cimentícia com adição de 10% de sílica ativa.

## **5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Como sugestões para pesquisas futuras, podem-se enumerar:

- Estudar a durabilidade dos compostos poliméricos em meio aquoso e quente;
- Complementar os ensaios de ponte de aderência com ensaios de arrancamento;
- Verificar a diferença entre os diversos meios de preparo da superfície de aderência: escarificação com ponteira e/ou talhadeira, escovação com cerdas de aço, abrasidas com jatos de areia ou similar, etc.
- Estudar a influência dos tratamentos das superfícies dos materiais sujeitos à abrasão, como o uso de fôrmas absorventes e de vácuo para a retirada da água de exsudação;
- A análise da resistência à abrasão de concretos utilizando vários tipos e dosagens de agregados, bem como a influência do teor de pasta;
- Verificar a resistência abrasão de outros tipos de materiais, como os cimentos aluminosos, a fim de pesquisa e comparação.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- AGUADO, A.; AGULLÓ, L.; CÁNOVAS, M. F.; SALLA, J. M.<sup>a</sup>. **Diagnóstico de daños y reparación de obras hidráulicas de hormigón. Monografías 19:** Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 285 p. [s.d.]
- AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**, tradução Geraldo G. Serra, 1ª Ed. São Paulo, PINI, 2000. 667 p.
- AMBROISE, J; MURAT, M.; PÉRA, J. **Hydratation reaction and hardening of calcined clays and related minerals. IV** - Experimental conditions for strength improvement on metakaolinite minicylinders. *Cement and Concrete Research*, v. 15, p.83-88, 1985a.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – Committee 210. **Erosion of Concrete in Hydraulic Structures**, ACI Materials Journal. Title N° 84-M17, p. 136-157, 1987. March – April.
- ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Vida Útil das Estruturas de Concretos**. In: PASSUELO, Alexandra; JACINTO, Ana; KIRCHHEIN, Ana; GUIMARÃES, André; SILVA, Ângelo; LOPES, Anne; FIGUEIREDO, Antônio; NEPOMUCENO, Antônio; MACHADO, Ari; VASCONCELOS, Augusto; TANGO, Carlos; KASMIERCZACK, Cláudio; SBRIGHI, Cláudio; DAL MOLIN, Denise; MONTEIRO, Eliana; BAUER, Elton; FIGUEIREDO, Ênio; THOMAZ, Ércio; CAUDURO, Eugênio; SILVA, Fábio; FONTES, Fernando; ISAIA, Geraldo; MELLO, Guilherme; BENINI, Humberto; RAMALHO, Ivan; GORNINSKI, Jane; ROSSIGNOLO, João; HANAI, João; BATLOUNI, Jorge; GIONGO, José; BALBO, José; MARTIN, Juan; TULA, Leonel; PINHEIRO, Libânio; SHEHATA, Lídia; DA SILVA, Luiz; PRUDÊNCIO, Luiz; RÊGO, Luiz; AGNESINI, Marcos; PEREIRA, Maria Fernanda; LIMA, Maryangela; ANDRADE, Moacir; RIBAS, Moema; GRAÇA, Newton; HASPARYK, Nicole; CASCUDO, Osvaldo; ASSAHI, Paulo; HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo; ALENCAR, Ricardo; BITTENCOURT, Rubens; LEVY, Salomon; PINHEIRO, Sayonara; KUPERMAN, Selmo; CENTURIONE, Sérgio; SANTOS Sérgio; PRISKULNICK, Simão; ANDRADE, Tibério; BITTENCOURT, Túlio; RODRIGUES, Vinícius; PAULON, Vladimir; REPETTE, Wellington; KIHARA, Yushiro. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Ed. G. C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v. cap. 31, p.923-951. ISBN (obra completa): 85-98576-04-2.
- ANDRADE, Tibério. **Tópicos sobre Durabilidade do Concreto**. In: PASSUELO, Alexandra; JACINTO, Ana; KIRCHHEIN, Ana; GUIMARÃES, André; SILVA, Ângelo; LOPES, Anne; FIGUEIREDO, Antônio; NEPOMUCENO, Antônio; MACHADO, Ari; VASCONCELOS, Augusto; TANGO, Carlos; KASMIERCZACK, Cláudio; SBRIGHI, Cláudio; DAL MOLIN, Denise; MONTEIRO, Eliana; BAUER, Elton; FIGUEIREDO, Ênio; THOMAZ, Ércio; CAUDURO, Eugênio; SILVA, Fábio; FONTES, Fernando; ISAIA, Geraldo; MELLO, Guilherme; BENINI, Humberto; RAMALHO, Ivan; ANDRADE, Jairo; GORNINSKI, Jane; ROSSIGNOLO, João; HANAI, João; BATLOUNI, Jorge; GIONGO, José; BALBO, José; MARTIN, Juan; TULA, Leonel; PINHEIRO, Libânio; SHEHATA, Lídia; DA SILVA, Luiz; PRUDÊNCIO, Luiz; RÊGO, Luiz; AGNESINI, Marcos; PEREIRA, Maria Fernanda; LIMA, Maryangela; ANDRADE, Moacir; RIBAS, Moema; GRAÇA, Newton; HASPARYK, Nicole; CASCUDO, Osvaldo; ASSAHI, Paulo; HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo; ALENCAR, Ricardo; BITTENCOURT, Rubens; LEVY, Salomon; PINHEIRO, Sayonara; KUPERMAN, Selmo; CENTURIONE, Sérgio; SANTOS Sérgio; PRISKULNICK, Simão; BITTENCOURT, Túlio; RODRIGUES, Vinícius;

PAULON, Vladimir; REPETTE, Wellington; KIHARA, Yushiro. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Ed. G. C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v. cap. 25, p. 753-792. ISBN (obra completa): 85-98576-04-2.

ANDRADE, W. P.; PAULON, V. A.; SAAD, M. N. A. **Repairing concrete erosion**. *Concrete International*, April, 1986, Vol. 8, Nº. 4. p. 46-49.

ANDRIOLO, F. R. **Construções de concreto**: manual de práticas de controle e execução, revisão Madalena B. Borgonove e Mariza Passos, 1ª Ed. São Paulo, PINI, 1984. 738 p.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues **Relatório de visita técnica à obra de Yacyreta**: Erosão na superfície do concreto. Relatório FRA-CIDY – 01/90. Andriolo Eng<sup>a</sup>. Outubro, 1990. 22 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - Departamento de Química. **Influência da sílica livre no processo de fabricação do cimento Portland e sua determinação quantitativa**. In: REUNIÃO de Técnicos da Indústria do Cimento, 38, São Paulo, agosto, 1988.

\_\_\_\_\_. *NBR9203: cimento Portland comum e clínquer* – análise química por complexometria. Cancelada 31/03/2004.

\_\_\_\_\_. *NBR7227: cimento Portland* – determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Cancelada 31/03/2004.

\_\_\_\_\_. *NBR5747: cimento Portland* – determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Cancelada 31/03/2004

\_\_\_\_\_. *NBRNM248: agregados* – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, jul. 2003.

\_\_\_\_\_. *NBRNM46: agregados* – determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, jul. 2003.

\_\_\_\_\_. *NBRNM53: agregados* – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, jul. 2003.

\_\_\_\_\_. *NBR7211: agregado para cimento* – especificação. Rio de Janeiro, março de 2005.

\_\_\_\_\_. *NBRNM52: agregados* - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, jul. 2003.

\_\_\_\_\_. *NBR7221: agregados* - ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro, ago.1987.

\_\_\_\_\_. *NBR5738: concreto* – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, dez. 2003.

\_\_\_\_\_. *NBR5739: concreto* – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, jul. 1994.

\_\_\_\_\_. *NBRNM 18: cimento Portland* – determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, março de 2004.

\_\_\_\_\_. *NBRNM 23: cimento Portland e outros materiais em pó* - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, jan. 1998.

\_\_\_\_\_. *NBRNM 51: agregado graúdo* – ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, dez. 2005.

- \_\_\_\_\_. **NBRNM 65: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas** – determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, jul.2003.
- \_\_\_\_\_. **NBRNM 76: cimento Portland** – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine). Rio de Janeiro, nov. 1996.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5732: cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, jul. 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5744: cimento Portland** – determinação de resíduo insolúvel. Cancelada 31/03/2004
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215: cimento Portland** – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, dez. 1996.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9202: cimento Portland e outros materiais em pó** – determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (número 325). Rio de Janeiro, dez. 1985.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11579: cimento Portland** – determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, jul. 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12042: materiais inorgânicos** – determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, abril de 1992.
- \_\_\_\_\_. **NBR 14724: informação e documentação** – trabalhos acadêmicos – apresentação. Rio de Janeiro, dez. 2005.
- BASTOS, P. S.dos S.; CÂMARA, L. C. **Resistência à tração na flexão e tenacidade de concretos de consistência seca reforçados com fibras de aço**. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil. 2002. 16 p.
- BONALDO, E.; BARROS, J. A. O.; LOURENÇO, P. B. **Bond characterization between concrete substrate and repairing SFRC using pull-off testing**. International Journal of Adhesion & Adhesives 25. 2005. p. 463-474.
- BOWDITCH, M. R. **The durability of adhesive joints in the presence of water**. International Journal of Adhesion & Adhesives 16. Nº 2. 1996. p. 73-79.
- BT 106 – BOLETIM TÉCNICO - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, ISBN 85-87024-23-X, 2002. 28p.
- BURGI, P. H.; ECKLEY, M. S. **Repairs at Glen Canyon Dam**. Concrete International, March, 1987, Vol. 9, Nº. 3. p. 24-31.
- CALLISTER JR. ,WILLIAM D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, tradução Sérgio Murilo Stamile Soares, 5ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2002. 589 p.
- DALFRÉ FILHO, J.G.; GENOVEZ, A. I. B.; PAULON, V. A. **Desgaste nas superfícies hidráulicas e resistência a abrasão do concreto**. Ingenieria Estructural. Asociación de ingenieros estructurales. Año 8, N º 20, p. 18-22. Agosto de 2000.
- DE SOUZA, Luiz Carlos Ferreira. **Algumas considerações sobre erosão e reparos em estruturas hidráulicas de concreto**. IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, Junho, 1983.
- DE SOUZA, Vicente Custódio; RIPPER, Thomaz. **Patologia, Recuperação e Reforço de estruturas de Concreto**. 5 ed. São Paulo: PINI, 1998. 255 p. ISBN 85-7266-096-8
- ELTOBGY, M. S.; NG, E. ;ELBESTAWI, M. A. **Finite element modeling of erosive**

- wear**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45. 2005. p. 1337 – 1346.
- EMMONS, Peter H. **Concrete Repair and Maintenance Illustrated: Problem Analysis, Repair Strategy, Techniques**. 3 ed. [S.l.]. R.S. Means Company Inc. Kingston, MA, 1993. 295 p. ISBN: 0-87629-286-4.
- FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da retração em materiais para reparos estruturais com adição de sílica ativa e fibras**. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. *Anais...* Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil. 2002. 16 p
- FRIGIONE, M.; AIELLO, M. A.; NADDEO, C. **Water effects on the bond strength of concrete/concrete adhesive joints**. *Construction and Building Materials*. 16p. June, 2005.
- 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. Foz do Iguaçu - Paraná – Brasil. 2001.
- GJØRV, O. E.; BAERLAND, T.; RONNING, H. R. **Abrasion resistance of High strength concrete pavements**. *Concrete International*, ACI, January, 1990, Vol. 12, Nº 1. p. 45-48.
- GRIM, R. E. **Propriedades de argilas**. *Cerâmica*, v.9, Nº.35, 1963.
- GULYAS, Robert J.; URBAS, Michael **Evaluation and Comparative Study of Overlays for Underwater Abrasion Resistance**. In: 46º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. *Anais...* Florianópolis – Santa Catarina – Brasil. 2004. p. II999-II1012.
- GUTIÉRREZ, P. A.; CÁNOVAS, M. F. **High -performance concrete: Requirements for constituent materials and mix proportioning**. *ACI Materials Journal*. Vol. 93. Nº 3. May- June. 1996.
- HASSAN, K. E.; BROOKS, J. J.; AL-ALAWI, L. **Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment**. *Cement & Concrete Composites* 23. 2001. p. 93-101.
- HÖPPEL, H. W.; MUGHRABI, H.; SOCKEL, H. – G.; SCHMIDT, S.; VETTER, G. **Hydroabrasive wear behaviour and damage mechanisms of different hard coatings**. *Wear* 225-229.1999. p. 1088-1099.
- HOPPING, P. N.; MASS, G. R. **Cavitation damage on the Karun Dam**. *Concrete International*, ACI, January, 1987, Vol. 9, Nº. 3. p. 41-48.
- HORSZCZARUK, E. **Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures**. *Wear* 259. p. 62-69. May 2005.
- HORSZCZARUK, E. **The model of abrasive wear of concrete in hydraulic structures**. *Wear* 256. p. 787-796. 2004.
- HOUGHTON, D. L.; BORGE, O. E.; PAXTON, J. A. **Cavitation resistance of some special concretes**. *ACI Journal*, December, 1978, Vol. 75, Nº. 12. p. 664-667.
- JENNI, A. *et al.* **Influence of Polymers on microstructure and adhesion strength of cementitious tile adhesive mortars**. *Cement and Concrete Research*. 35. p. 35-50. 2005.
- KORMANN, A. C. M. *et al.* **Metodologias de reparos em estruturas hidráulicas de barragens. Parte 1, estudos preliminares**. In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. *Anais...* Foz do Iguaçu - Paraná – Brasil. 2001. 16 p.

- KORMANN, A. C. M. *et al.* **Desempenho de fibras de aço em concretos sujeitos à abrasão hidráulica.** In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil. 2002. 12 p.
- LEONARDO, C. R. de T. *et al.* **Concreto de alto desempenho como material de reparo para estruturas hidráulicas erodidas.** *Revista IBRACON.* Ano X, Nº. 31, p. 72-78, 2002. ISSN 1415-224X. Outubro – Dezembro.
- LI, H.; ZHANG, M.; OU, J. **Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement.** *Wear.* 2005. Não paginado.
- MACKENZIE, R.C. **Differential thermal analysis.** London: Academic Press. 2v., 1970.
- MAILVAGANAM, N. P. **Concrete repair and rehabilitation: issues and trends.** *e-Mat* – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 1, Nº. 1, p. 1-9. Maio 2004. ISSN 1806-3969.
- MARCHANTE, José Oscar; ROSÁRIO, Luiz César; BRAGA, José Augusto **Resistência à abrasão da superfície do concreto.** IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, Junho, 1983.
- MAYS, G. C. **Performance requirements for structural adhesives in relation to concrete strengthening.** *International Journal of Adhesion & Adhesives* 21. 2001. p. 423-429.
- MCDONALD, J. E.; LIU, T. C. **Repair of concrete surfaces subjected to abrasion-erosion damage: Case histories 1.** *Concrete International*, September, 1980, Vol. 2, Issue 9. p. 103-115.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, properties and materials.** 3 ed. [S.l.]. McGraw-Hill Companies Inc. 2006. 659 p.
- MIRZA, J.; DURAND, B. **Evaluation, selection and installation of surface repair mortars at a dam site.** *Construction and Building Materials.* 1994. Volume 8. Number 1.
- MOMBER, A. W. **The erosion of cement paste, mortar and concrete by gritblasting.** *Wear* 246. 2000. p. 46-54.
- MONTEIRO, Eliana Barreto. **Reabilitação de Estruturas de Concreto.** In: PASSUELO, Alexandra; JACINTO, Ana; KIRCHHEIN, Ana; GUIMARÃES, André; SILVA, Ângelo; LOPES, Anne; FIGUEIREDO, Antônio; NEPOMUCENO, Antônio; MACHADO, Ari; VASCONCELOS, Augusto; TANGO, Carlos; KASMIERCZACK, Cláudio; SBRIGHI, Cláudio; DAL MOLIN, Denise; BAUER, Elton; FIGUEIREDO, Ênio; THOMAZ, Ércio; CAUDURO, Eugênio; SILVA, Fábio; FONTES, Fernando; ISAIÁ, Geraldo; MELLO, Guilherme; BENINI, Humberto; RAMALHO, Ivan; ANDRADE, Jairo; GORNINSKI, Jane; ROSSIGNOLO, João; HANAI, João; BATLOUNI, Jorge; GIONGO, José; BALBO, José; MARTIN, Juan; TULA, Leonel; PINHEIRO, Libânio; SHEHATA, Lídia; DA SILVA, Luiz; PRUDÊNCIO, Luiz; RÊGO, Luiz; AGNESINI, Marcos; PEREIRA, Maria Fernanda; LIMA, Maryangela; ANDRADE, Moacir; RIBAS, Moema; GRAÇA, Newton; HASPARYK, Nicole; CASCUDO, Osvaldo; ASSAHI, Paulo; HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo; ALENCAR, Ricardo; BITTENCOURT, Rubens; LEVY, Salomon; PINHEIRO, Sayonara; KUPERMAN, Selmo; CENTURIONE, Sérgio; SANTOS Sérgio; PRISKULNICK, Simão; ANDRADE, Tibério; BITTENCOURT, Túlio; RODRIGUES, Vinícius; PAULON, Vladimir; REPETTE, Wellington; KIHARA, Yushiro. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** Ed. G. C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v.



- cap. 36, p. 1109-1125. ISBN (obra completa): 85-98576-04-2.
- MORENO JUNIOR, R.; SELMO, S. M. **Reparos localizados superficiais em estruturas de concreto** – Análise da aderência segundo métodos de ensaio distintos. In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Foz do Iguaçu – Paraná – Brasil. 2001. 16 p.
- MORGAN, D. R. **Compatibility of concrete repair materials and systems**. Construction and Building Materials, Vol. 10, No 1, p. 57-67, 1996.
- NAIK, T. R. *et al.* **Abrasion resistance of high-strength concrete made with Class C fly ash**. **ACI Materials Journal**, 1995, 92, (6), 649-659.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**, tradução Eng. Salvador E. Giammusso, 2ª Ed. São Paulo, PINI, 1997. 828 p.
- OHAMA, Y. **Recent progress in concrete-polymer composites**. **Advanced Cement Based Materials – Review Article**. Nº. 5, p. 31-40, 1997. ISSN 1065-7355. ed. Elsevier Science Ltda.
- POPINEAU, S.; SHANAHAN, M. E. R. **Simple model to estimate adhesion of structural bonding during humid ageing**. **International Journal of Adhesion & Adhesives**. 26. p. 363-370. 2006.
- ROSSIGNOLO, J. A. **Efeito da sílica ativa e do látex SBR na zona de transição interfacial pasta- agregado: Parte 1 – agregado basáltico**. e- Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 1. Nº 2 . p. 105-113. Novembro 2004.
- SCHRADER, E.; TATRO, S. **Cavitation and erosion damage to concrete in dams**. **Concrete International**, Março, Ano 1987, Vol. 9, Nº. 3. p. 15-23.
- SCRIVENER, K. L.; CABIRON, J.; LETOURNEUX, R. **High-performance concretes from calcium aluminate cements**. **Cement and Concrete Research**. 29. p. 1215-1223. 1999.
- SEBÖK, T.; STRÁNĚL, O. **Wear resistance of polymer- impregnated mortars and concrete**. **Cement and Concrete Research** 34. 2004. p. 1853 – 1858.
- SGARBOZA, B. C.; BISPO, D. H.; PAULON, V. A. **Considerações sobre o concreto para a soleira do vertedouro de Água Vermelha**. XII Seminário Nacional de Grandes Barragens. São Paulo. Abril, 1978.
- SGARBOZA, B. C.; CARVALHO de, R. C. C.; KUPERMAN, S. C.; PAULON, V. A. **Considerações sobre a concretagem e desempenho do vertedouro de Água Vermelha**. XIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Rio de Janeiro. Abril, 1980.
- SILVA, C.A.; NASCIMENTO, M.C.H.; COSTA, T.C.D. **Estágio de Campo III – Ourém (Pará)**. Belém, 1994. 116p. Relatório final – Departamento de Geologia, Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará.
- SILVA, F. H. P. da *et al.* **Efeito da incorporação de fibras de aço nas resistências mecânicas de concretos comuns e de alto desempenho**. In: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Fortaleza – Ceará – Brasil. 2000. 12 p.
- SLIKKERVEER, P. J.; VAN DONGEN, M. H. A.; TOUWSLAGER, F. J. **Erosion of elastomeric protective coatings**. **Wear** 236. 1999. p. 189-198.

- VASCONCELOS, C. **O concreto anti - abrasão. Revista Recuperar.** N° 58 – Ano 11. Março – Abril, 2004. p . 20 – 24.
- VILLALBA, P. E. *et al.* **Estudo de argamassas para reparo de estruturas de concreto sujeitas à abrasão, em locais com umidade elevada. Revista IBRACON.** Ano X, N° 30, p. 53-66, 2002. ISSN 1415-224X. Julho – Setembro.
- YEN, T.; HSU, T.; LIU, Y. CHEN, S. **Influence of class F fly ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete. Construction and Building Materials.** 6p. June, 2005.
- ZAMPIERI, V.A. **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas:** fabricação, hidratação e desempenho mecânico. São Paulo, 1993. 233p. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia da Universidade de São Paulo.
- ZAMPIERI, V.A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas.** São Paulo, 1989. 191p. Dissertação de mestrado - Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia da Universidade de São Paulo.

## 7 BIBLIOGRAFIA.

AGUADO, A.; AGULLÓ, L.; CÁNOVAS, M. F.; SALLA, J. M.<sup>a</sup>. **Diagnóstico de daños y reparación de obras hidráulicas de hormigón. Monografías 19:** Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 285 p. [s.d.]

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**, tradução Geraldo G. Serra, 1ª Ed. São Paulo, PINI, 2000. 667 p.

AMBROISE, J; MURAT, M.; PÉRA, J. **Hydratation reaction and hardening of calcined clays and related minerals**. IV - Experimental conditions for strength improvement on metakaolinite minicylinders. Cement and Concrete Research, v. 15, p.83-88, 1985a.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – Committee 210. **Erosion of Concrete in Hydraulic Structures**, ACI Materials Journal. Title N° 84-M17, p. 136-157, 1987. March – April.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Vida Útil das Estruturas de Concretos**. In: PASSUELO, Alexandra; JACINTO, Ana; KIRCHHEIN, Ana; GUIMARÃES, André; SILVA, Ângelo; LOPES, Anne; FIGUEIREDO, Antônio; NEPOMUCENO, Antônio; MACHADO, Ari; VASCONCELOS, Augusto; TANGO, Carlos; KASMIERCZACK, Cláudio; SBRIGHI, Cláudio; DAL MOLIN, Denise; MONTEIRO, Eliana; BAUER, Elton; FIGUEIREDO, Ênio; THOMAZ, Ércio; CAUDURO, Eugênio; SILVA, Fábio; FONTES, Fernando; ISAIA, Geraldo; MELLO, Guilherme; BENINI, Humberto; RAMALHO, Ivan; GORNINSKI, Jane; ROSSIGNOLO, João; HANAI, João; BATLOUNI, Jorge; GIONGO, José; BALBO, José; MARTIN, Juan; TULA, Leonel; PINHEIRO, Libânio; SHEHATA, Lídia; DA SILVA, Luiz; PRUDÊNCIO, Luiz; RÊGO, Luiz; AGNESINI, Marcos; PEREIRA, Maria Fernanda; LIMA, Maryangela; ANDRADE, Moacir; RIBAS, Moema; GRAÇA, Newton; HASPARYK, Nicole; CASCUDO, Osvaldo; ASSAHI, Paulo; HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo; ALENCAR, Ricardo; BITTENCOURT, Rubens; LEVY, Salomon; PINHEIRO, Sayonara; KUPERMAN, Selmo; CENTURIONE, Sérgio; SANTOS Sérgio; PRISKULNICK, Simão; ANDRADE, Tibério; BITTENCOURT, Túlio; RODRIGUES, Vinícius; PAULON, Vladimir; REPETTE, Wellington; KIHARA, Yushiro. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Ed. G. C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v. cap. 31, p.923-951. ISBN (obra completa): 85-98576-04-2.

ANDRADE, Tibério. **Tópicos sobre Durabilidade do Concreto**. In: PASSUELO, Alexandra; JACINTO, Ana; KIRCHHEIN, Ana; GUIMARÃES, André; SILVA, Ângelo; LOPES, Anne; FIGUEIREDO, Antônio; NEPOMUCENO, Antônio; MACHADO, Ari; VASCONCELOS, Augusto; TANGO, Carlos; KASMIERCZACK, Cláudio; SBRIGHI, Cláudio; DAL MOLIN, Denise; MONTEIRO, Eliana; BAUER, Elton; FIGUEIREDO, Ênio; THOMAZ, Ércio; CAUDURO, Eugênio; SILVA, Fábio; FONTES, Fernando; ISAIA, Geraldo; MELLO, Guilherme; BENINI, Humberto; RAMALHO, Ivan; ANDRADE, Jairo; GORNINSKI, Jane; ROSSIGNOLO, João; HANAI, João; BATLOUNI, Jorge; GIONGO, José; BALBO, José; MARTIN, Juan; TULA, Leonel; PINHEIRO, Libânio; SHEHATA, Lídia; DA SILVA, Luiz; PRUDÊNCIO, Luiz; RÊGO, Luiz; AGNESINI, Marcos; PEREIRA, Maria Fernanda; LIMA, Maryangela; ANDRADE, Moacir; RIBAS, Moema; GRAÇA, Newton; HASPARYK, Nicole; CASCUDO, Osvaldo; ASSAHI, Paulo; HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo; ALENCAR, Ricardo; BITTENCOURT, Rubens; LEVY, Salomon; PINHEIRO, Sayonara; KUPERMAN, Selmo; CENTURIONE, Sérgio; SANTOS

Sérgio; PRISKULNICK, Simão; BITTENCOURT, Túlio; RODRIGUES, Vinícius; PAULON, Vladimir; REPETTE, Wellington; KIHARA, Yushiro. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Ed. G. C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v. cap. 25, p. 753-792. ISBN (obra completa): 85-98576-04-2.

ANDRADE, W. P.; PAULON, V. A.; SAAD, M. N. A. **Repairing concrete erosion**. **Concrete International**, April, 1986, Vol. 8, Nº. 4. p. 46-49.

ANDRIOLO, F. R. **Construções de concreto**: manual de práticas de controle e execução, revisão Madalena B. Borgonove e Mariza Passos, 1ª Ed. São Paulo, PINI, 1984. 738 p.

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues **Relatório de visita técnica à obra de Yacyreta**: Erosão na superfície do concreto. Relatório FRA-CIDY – 01/90. Andriolo Eng<sup>a</sup>. Outubro, 1990. 22 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - Departamento de Química. **Influência da sílica livre no processo de fabricação do cimento Portland e sua determinação quantitativa**. In: REUNIÃO de Técnicos da Indústria do Cimento, 38, São Paulo, agosto, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBRNM43: cimento Portland** – determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, jul. 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR9203: cimento Portland comum e clínquer** – análise química por complexometria. Cancelada 31/03/2004.

\_\_\_\_\_. **NBR7227: cimento Portland** – determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Cancelada 31/03/2004.

\_\_\_\_\_. **NBR5747: cimento Portland** – determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Cancelada 31/03/2004

\_\_\_\_\_. **NBRNM248: agregados** – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, jul. 2003.

\_\_\_\_\_. **NBRNM46: agregados** – determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, jul. 2003.

\_\_\_\_\_. **NBRNM53: agregados** – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, jul. 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR7211: agregado para cimento** – especificação. Rio de Janeiro, março de 2005.

\_\_\_\_\_. **NBRNM52: agregados** - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, jul. 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR7221: agregados** - ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro, ago.1987.

\_\_\_\_\_. **NBR5738: concreto** – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, dez. 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR5739: concreto** – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, jul. 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR5733: cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, jul. 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR6023: informação e documentação** - referências – elaboração. Rio de

Janeiro, ago. 2002.

- \_\_\_\_\_. *NBRNM 18: cimento Portland* – determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, março de 2004.
- \_\_\_\_\_. *NBRNM 23: cimento Portland e outros materiais em pó* - determinação da massa específica. Rio de Janeiro, jan. 1998.
- \_\_\_\_\_. *NBRNM 51: agregado graúdo* – ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, dez. 2005.
- \_\_\_\_\_. *NBRNM 65: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas* – determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, jul.2003.
- \_\_\_\_\_. *NBRNM 76: cimento Portland* – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine). Rio de Janeiro, nov. 1996.
- \_\_\_\_\_. *NBR 5732: cimento Portland comum*. Rio de Janeiro, jul. 1991.
- \_\_\_\_\_. *NBR 5744: cimento Portland* – determinação de resíduo insolúvel. Cancelada 31/03/2004
- \_\_\_\_\_. *NBR 7215: cimento Portland* – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, dez. 1996.
- \_\_\_\_\_. *NBR 9202: cimento Portland e outros materiais em pó* – determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (número 325). Rio de Janeiro, dez. 1985.
- \_\_\_\_\_. *NBR 11579: cimento Portland* – determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, jul. 1991.
- \_\_\_\_\_. *NBR 12042: materiais inorgânicos* – determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, abril de 1992.
- \_\_\_\_\_. *NBR 14724: informação e documentação* – trabalhos acadêmicos – apresentação. Rio de Janeiro, dez. 2005.
- BARATA, M.S. **Concreto de Alto Desempenho no Pará: Estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim.** Porto Alegre, 1998. 164p. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BASTOS, P. S.dos S.; CÂMARA, L. C. **Resistência à tração na flexão e tenacidade de concretos de consistência seca reforçados com fibras de aço.** In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. *Anais...* Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil. 2002. 16 p.
- BONALDO, E.; BARROS, J. A. O.; LOURENÇO, P. B. **Bond characterization between concrete substrate and repairing SFRC using pull-off testing.** *International Journal of Adhesion & Adhesives* 25. 2005. p. 463-474.
- BOWDITCH, M. R. **The durability of adhesive joints in the presence of water.** *International Journal of Adhesion & Adhesives* 16. Nº 2. 1996. p. 73-79.
- BT 106 – BOLETIM TÉCNICO - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland.** 7.ed. São Paulo, ISBN 85-87024-23-X, 2002. 28p.
- BURGI, P. H.; ECKLEY, M. S. **Repairs at Glen Canyon Dam.** *Concrete International*,

- March, 1987, Vol. 9, Nº. 3. p. 24-31.
- CALAINHO, J. A. L. *et al.* Cavitação de turbinas hidráulicas do tipo Francis e Kaplan no Brasil. In: XV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Anais...** Foz do Iguaçu – Paraná – Brasil, 1999. 6 p.
- CALLISTER JR. ,WILLIAM D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, tradução Sérgio Murilo Stamile Soares, 5ª Ed. Rio de Janeiro, LTC, 2002. 589 p.
- CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira; CINCOTTO, Maria Alba **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/237, São Paulo – EPUSP, ISSN 0103-9830, Março, 1999. 16p.
- CARNEIRO, Arnaldo Manuel Pereira; BARATA, Márcio Santos **Produção de pozolanas altamente reativas (metacaulim) a partir da calcinação e moagem dos rejeitos do processo de beneficiamento do caulim da CADAM: Relatório Final**. Universidade Federal do Pará. Núcleo de Habitação da Amazônia – NUHAM. Dezembro, 2000. 64 p.
- CARNEIRO, Arnaldo Manuel Pereira; BARATA, Márcio Santos; PICANÇO, Marcelo de Souza **Análise de propriedades de concretos produzidos com agregados de composição granulométrica otimizada**. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil. 2002. 12 p
- CHENG C. L.; WEBSTER C.T.; WONG J.Y. Cavitation-resistant coatings for concrete hydraulic structures. **ACI Materials Journal**, November-December, 1990, Vol. 87, Nº. 6, p. 594-601.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP **Relatório C-31/81: Reparos no vertedouro de superfície da usina Armando A. Laydner**. Laboratório Central de Engenharia Civil – CESP. Novembro, 1981. 21 p.
- DALFRÉ FILHO, J.G.; GENOVEZ, A. I. B.; PAULON, V. A. **Desgaste nas superfícies hidráulicas e resistência a abrasão do concreto**. **Ingenieria Estructural**. Asociación de ingenieros estructurales. Año 8, N º 20, p. 18-22. Agosto de 2000.
- DE SOUZA, Luiz Carlos Ferreira. **Algumas considerações sobre erosão e reparos em estruturas hidráulicas de concreto**. IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, Junho, 1983.
- DE SOUZA, Vicente Custódio; RIPPER, Thomaz. **Patologia, Recuperação e Reforço de estruturas de Concreto**. 5 ed. São Paulo: PINI, 1998. 255 p. ISBN 85-7266-096-8
- ELTOBGY, M. S.; NG, E. ;ELBESTAWI, M. A. **Finite element modeling of erosive wear**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45. 2005. p. 1337 – 1346.
- EMMONS, Peter H. **Concrete Repair and Maintenance Illustrated: Problem Analysis, Repair Strategy, Techniques**. 3 ed. [S.l]. R.S. Means Company Inc. Kingston, MA, 1993. 295 p. ISBN: 0-87629-286-4.
- EMPREITEIRO, O Curuá-Una: esta barragem foi construída sobre areia. Acredita? **Revista O Empreiteiro**. p. 14-25. Novembro, 1972.
- FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da retração em materiais para reparos estruturais com adição de sílica ativa e fibras**. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil. 2002. 16 p
- FRIGIONE, M.; AIELLO, M. A.; NADDEO, C. **Water effects on the bond strength of concrete/concrete adhesive joints**. **Construction and Building Materials**. 16p. June,

2005.

- 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. Foz do Iguaçu - Paraná – Brasil. 2001.
- GJØRV, O. E.; BAERLAND, T.; RONNING, H. R. **Abrasion resistance of High strength concrete pavements.** *Concrete International*, ACI, January, 1990, Vol. 12, Nº 1. p. 45-48.
- GRIM, R. E. **Propriedades de argilas.** Cerâmica, v.9, Nº.35, 1963.
- GULYAS, Robert J.; URBAS, Michael **Evaluation and Comparative Study of Overlays for Underwater Abrasion Resistance.** In: 46º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais... Florianópolis – Santa Catarina – Brasil. 2004. p. II999-III1012.
- GUTIÉRREZ, P. A.; CÁNOVAS, M. F. **High -performance concrete: Requirements for constituent materials and mix proportioning.** *ACI Materials Journal*. Vol. 93. Nº 3. May- June. 1996.
- HASSAN, K. E.; BROOKS, J. J.; AL-ALAWI, L. **Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment.** *Cement & Concrete Composites* 23. 2001. p. 93-101.
- HÖPPEL, H. W.; MUGHRABI, H.; SOCKEL, H. – G.; SCHMIDT, S.; VETTER, G. **Hydroabrasive wear behaviour and damage mechanisms of different hard coatings.** *Wear* 225-229.1999. p. 1088-1099.
- HOPPING, P. N.; MASS, G. R. **Cavitation damage on the Karun Dam.** *Concrete International*, ACI, January, 1987, Vol. 9, Nº. 3. p. 41-48.
- HORSZCZARUK, E. **Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures.** *Wear* 259. p. 62-69. May 2005.
- HORSZCZARUK, E. **The model of abrasive wear of concrete in hydraulic structures.** *Wear* 256. p. 787-796. 2004.
- HOUGHTON, D. L.; BERGE, O. E.; PAXTON, J. A. **Cavitation resistance of some special concretes.** *ACI Journal*, December, 1978, Vol. 75, Nº. 12. p. 664-667.
- JENNI, A. *et al.* **Influence of Polymers on microstructure and adhesion strength of cementitious tile adhesive mortars.** *Cement and Concrete Research*. 35. p. 35-50. 2005.
- KORMANN, A. C. M. *et al.* **Metodologias de reparos em estruturas hidráulicas de barragens. Parte 1, estudos preliminares.** In: 43º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais... Foz do Iguaçu - Paraná – Brasil. 2001. 16 p.
- KORMANN, A. C. M. *et al.* **Desempenho de fibras de aço em concretos sujeitos à abrasão hidráulica.** In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais... Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil. 2002. 12 p.
- LEONARDO, C. R. de T. *et al.* **Concreto de alto desempenho como material de reparo para estruturas hidráulicas erodidas.** *Revista IBRACON*. Ano X, Nº. 31, p. 72-78, 2002. ISSN 1415-224X. Outubro – Dezembro.
- LI, H.; ZHANG, M.; OU, J. **Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement.** *Wear*. 2005. Não paginado.
- MACKENZIE, R.C. **Differential thermal analysis.** London: Academic Press. 2v., 1970.

- MAILVAGANAM, N. P. **Concrete repair and rehabilitation: issues and trends. e-Mat** – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 1, N<sup>o</sup>. 1, p. 1-9. Maio 2004. ISSN 1806-3969.
- MARCHANTE, José Oscar; ROSÁRIO, Luiz César; BRAGA, José Augusto **Resistência à abrasão da superfície do concreto**. IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, Junho, 1983.
- MAYS, G. C. **Performance requirements for structural adhesives in relation to concrete strengthening**. International Journal of Adhesion & Adhesives 21. 2001. p. 423-429.
- MCDONALD, J. E.; LIU, T. C. **Repair of concrete surfaces subjected to abrasion-erosion damage: Case histories 1. Concrete International**, September, 1980, Vol. 2, Issue 9. p. 103-115.
- MEFFORD, B. W.; MULLER JR, B. C. Cavitation damage and repair of Stampede Dam. **Concrete International**, 1987, Vol. 9, N<sup>o</sup> 3. p. 49-54.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, properties and materials**. 3 ed. [S.l.]. McGraw-Hill Companies Inc. 2006. 659 p.
- MIRZA, J.; DURAND, B. **Evaluation, selection and installation of surface repair mortars at a dam site**. Construction and Building Materials. 1994. Volume 8. Number 1.
- MOMBER, A. W. **The erosion of cement paste, mortar and concrete by gritblasting**. **Wear** 246. 2000. p. 46-54.
- MONTEIRO, Eliana Barreto. **Reabilitação de Estruturas de Concreto**. In: PASSUELO, Alexandra; JACINTO, Ana; KIRCHHEIN, Ana; GUIMARÃES, André; SILVA, Ângelo; LOPES, Anne; FIGUEIREDO, Antônio; NEPOMUCENO, Antônio; MACHADO, Ari; VASCONCELOS, Augusto; TANGO, Carlos; KASMIERCZACK, Cláudio; SBRIGHI, Cláudio; DAL MOLIN, Denise; BAUER, Elton; FIGUEIREDO, Ênio; THOMAZ, Êrcio; CAUDURO, Eugênio; SILVA, Fábio; FONTES, Fernando; ISAIA, Geraldo; MELLO, Guilherme; BENINI, Humberto; RAMALHO, Ivan; ANDRADE, Jairo; GORNINSKI, Jane; ROSSIGNOLO, João; HANAI, João; BATLOUNI, Jorge; GIONGO, José; BALBO, José; MARTIN, Juan; TULA, Leonel; PINHEIRO, Libânio; SHEHATA, Lídia; DA SILVA, Luiz; PRUDÊNCIO, Luiz; RÊGO, Luiz; AGNESINI, Marcos; PEREIRA, Maria Fernanda; LIMA, Maryangela; ANDRADE, Moacir; RIBAS, Moema; GRAÇA, Newton; HASPARYK, Nicole; CASCUDO, Osvaldo; ASSAHI, Paulo; HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo; ALENCAR, Ricardo; BITTENCOURT, Rubens; LEVY, Salomon; PINHEIRO, Sayonara; KUPERMAN, Selmo; CENTURIONE, Sérgio; SANTOS Sérgio; PRISKULNICK, Simão; ANDRADE, Tibério; BITTENCOURT, Túlio; RODRIGUES, Vinícius; PAULON, Vladimir; REPETTE, Wellington; KIHARA, Yushiro. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Ed. G. C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2005. 2 v. cap. 36, p. 1109-1125. ISBN (obra completa): 85-98576-04-2.
- MORENO JUNIOR, R.; SELMO, S. M. **Reparos localizados superficiais em estruturas de concreto** – Análise da aderência segundo métodos de ensaio distintos. In: 43<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Foz do Iguaçu – Paraná – Brasil. 2001. 16 p.
- MORGAN, D. R. **Compatibility of concrete repair materials and systems**. Construction and Building Materials, Vol. 10, No 1, p. 57-67, 1996.



- NAIK, T. R. *et al.* **Abrasion resistance of high-strength concrete made with Class C fly ash.** *ACI Materials Journal*, 1995, 92, (6), 649-659.
- NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**, tradução Eng. Salvador E. Giammusso, 2ª Ed. São Paulo, PINI, 1997. 828 p.
- ODNR - OHIO DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES. **Dam Safety: Problems with concrete materials.** ODNR – Division of Water Fact Sheet nº 56. 1999. 2 p.
- OHAMA, Y. **Recent progress in concrete-polymer composites.** *Advanced Cement Based Materials – Review Article*. Nº. 5, p. 31-40, 1997. ISSN 1065-7355. ed. Elsevier Science Ltda.
- POPINEAU, S.; SHANAHAN, M. E. R. **Simple model to estimate adhesion of structural bonding during humid ageing.** *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 26. p. 363-370. 2006.
- PORTELA, E. T. A. Inspeções em obras de concreto: uma abordagem metodológica. In: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. *Anais...* Fortaleza – Ceará – Brasil. 2000. 16 p.
- RAO, P. V. Evaluation of epoxy resins in flow cavitation erosion. *Wear*, 122. 1988, p. 77-95.
- REMR – REPAIR, EVALUATION, MAINTENANCE AND REHABILITATION. **Specialized Repair Technique: Repair of structures damaged by cavitation-erosion.** REMR Technical Note CS-MR-9.2, 1985. 2 p.
- ROSSIGNOLO, J. A. **Efeito da sílica ativa e do látex SBR na zona de transição interfacial pasta- agregado: Parte 1 – agregado basáltico. e- Mat** – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 1. Nº 2 . p. 105-113. Novembro 2004.
- SALLES, Flávio Moreira **Publicação eletrônica** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <[fandrio@ibm.net](mailto:fandrio@ibm.net)> em 1 de Outubro de 1999 às 14h55min horas. CESP/LCEC/Núcleo de Tecnologia. Impr. 3 p.
- SCHRADER, E.; TATRO, S. **Cavitation and erosion damage to concrete in dams.** *Concrete International*, Março, Ano 1987, Vol. 9, Nº. 3. p. 15-23.
- SCRIVENER, K. L.; CABIRON, J.; LETOURNEUX, R. **High-performance concretes from calcium aluminate cements.** *Cement and Concrete Research*. 29. p. 1215-1223. 1999.
- SEBÖK, T.; STRÁNĚL, O. **Wear resistance of polymer- impregnated mortars and concrete.** *Cement and Concrete Research* 34. 2004. p. 1853 – 1858.
- SGARBOZA, B. C.; BISPO, D. H.; PAULON, V. A. **Considerações sobre o concreto para a soleira do vertedouro de Água Vermelha.** XII Seminário Nacional de Grandes Barragens. São Paulo. Abril, 1978.
- SGARBOZA, B. C.; CARVALHO de, R. C. C.; KUPERMAN, S. C.; PAULON, V. A. **Considerações sobre a concretagem e desempenho do vertedouro de Água Vermelha.** XIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Rio de Janeiro. Abril, 1980.
- SILVA, C.A.; NASCIMENTO, M.C.H.; COSTA, T.C.D. **Estágio de Campo III – Ourém (Pará).** Belém, 1994. 116p. Relatório final – Departamento de Geologia, Centro de

Geociências da Universidade Federal do Pará.

SILVA, F. H. P. da *et al.* **Efeito da incorporação de fibras de aço nas resistências mecânicas de concretos comuns e de alto desempenho.** In: 42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** Fortaleza – Ceará – Brasil. 2000. 12 p.

Síntese da UHE Curuá-Uma, **Relatório interno da Centrais Elétricas do Pará.**

SLIKKERVEER, P. J.; VAN DONGEN, M. H. A.; TOUWSLAGER, F. J. **Erosion of elastomeric protective coatings.** *Wear* 236. 1999. p. 189-198.

THEMAG Eng<sup>a</sup> Ltda. **Relatório interno:** Incidentes no vertedouro de Ilha Solteira. Outubro, 1981. 53 p.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios:** causas, prevenção e recuperação., 1ª Ed. São Paulo, PINI: Escola politécnica da Universidade de São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989. 194 p.

TODAN H. L.; ARAÚJO, M. J de; MARTINS JÚNIOR, F. L. **Relatório técnico de inspeção realizada na UHE de Diacal.** LG Eng<sup>a</sup>. Palmas, Abril, 2002. 29 p.

TODAN H. L.; ARAÚJO, M. J de; MARTINS JÚNIOR, F. L. **Relatório técnico de inspeção realizada na UHE de Dianópolis.** LG Eng<sup>a</sup>. Palmas, Abril, 2002. 28 p.

TODAN H. L.; ARAÚJO, M. J de; MARTINS JÚNIOR, F. L. **Relatório técnico de inspeção realizada na UHE de Jorge Queiróz.** LG Eng. <sup>a</sup>. Palmas, Abril, 2002. 30 p.

TODAN H. L.; ARAÚJO, M. J de; MARTINS JÚNIOR, F. L. **Relatório técnico de inspeção realizada na UHE de Sobrado.** LG Eng<sup>a</sup>. Palmas, Abril, 2002. 27 p.

UHE Curuá-Una – Serviços de injeção de calda de cimento na blindagem da máquina 2, **Relatório LEC-CM-24/89**, CESP – Companhia Energética de São Paulo.

VASCONCELOS, C. **O concreto anti - abrasão.** *Revista Recuperar.* N° 58 – Ano 11. Março – Abril, 2004. p . 20 – 24.

VILLALBA, P. E. *et al.* **Estudo de argamassas para reparo de estruturas de concreto sujeitas à abrasão, em locais com umidade elevada.** *Revista IBRACON.* Ano X, N° 30, p. 53-66, 2002. ISSN 1415-224X. Julho – Setembro.

YEN, T.; HSU, T.; LIU, Y. CHEN, S. **Influence of class F fly ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete.** *Construction and Building Materials.* 6p. June, 2005.

ZAMPIERI, V.A. **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas:** fabricação, hidratação e desempenho mecânico. São Paulo, 1993. 233p. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia da Universidade de São Paulo.

ZAMPIERI, V.A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas.** São Paulo, 1989. 191p. Dissertação de mestrado - Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia da Universidade de São Paulo.

## 8 APÊNDICE A – Resistência à Compressão Axial dos Cp's do Ensaio de Ponte de Aderência.

QUADRO DE RUPTURA DOS CP'S DO TESTE DE PONTE DE ADERÊNCIA

| TIPO                                          | CP Nº | fc3 (Mpa) | fc28 (Mpa) | PADRÃO |       | Local da ruptura (comentários)                                                         |
|-----------------------------------------------|-------|-----------|------------|--------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Resina acrílica - superfície UMDA             | 1     | 15,66     |            | 48,76  |       | Ruptura brusca com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 2     | 14,13     | 17,59      | 47,36  | 46,55 | Ruptura normal com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 3     | 22,98     |            | 43,54  |       | Ruptura normal com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 4     |           | 14,58      |        | 46,96 | Ruptura normal com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 5     | 17,88     | 20,44      | 48,87  | 46,50 | Ruptura normal com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 6     |           | 18,63      |        | 53,15 | Ruptura normal com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
| Resina EPÓXI - superfície SECA                | 1     | 27,12     |            | 48,76  |       | Ruptura brusca com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 2     | 15,35     | 21,80      | 47,36  | 46,55 | Ruptura brusca com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 3     | 22,92     |            | 43,54  |       | Ruptura brusca com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 4     |           | 32,16      |        | 46,96 | Ruptura brusca com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 5     | 25,82     | 23,24      | 48,87  | 46,50 | Ruptura brusca com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 6     |           | 22,05      |        | 53,15 | Ruptura brusca com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
| Primer EPÓXI - superfície UMDA                | 1     | 15,91     |            | 48,76  |       | Ruptura brusca com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 2     | 12,22     | 12,64      | 47,36  | 46,55 | Ruptura normal com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 3     | 9,80      |            | 43,54  |       | Ruptura normal com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 4     |           | 15,68      |        | 46,96 | Ruptura normal com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 5     | 19,95     | 20,84      | 48,87  | 46,50 | Ruptura normal com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
|                                               | 6     |           | 23,33      |        | 53,15 | Ruptura normal com descolamento da ponte com o concreto antigo                         |
| Pasta cimentícia 0% de adição                 | 1     | 25,46     |            | 47,11  |       | Ruptura brusca com descolamento na ponte                                               |
|                                               | 2     | 44,31     | 43,55      | 42,01  | 44,56 | Ruptura brusca com descolamento na ponte                                               |
|                                               | 3     | 42,78     |            | --     |       | Ruptura brusca com descolamento na ponte                                               |
|                                               | 4     |           | 33,49      |        | 44,00 | Ruptura brusca, imediata, entre o velho e a pasta e em ambos.                          |
|                                               | 5     | 42,50     | 39,28      | 46,93  | 44,72 | Ruptura brusca no concreto velho                                                       |
|                                               | 6     |           | 54,72      |        | 52,08 | Ruptura brusca no ponte com o concreto velho e no velho                                |
| Pasta cimentícia de SILICA - 10% de adição    | 1     | 46,51     |            | 51,39  |       | Lascou antes de explodir violentamente (ponte)                                         |
|                                               | 2     | 43,34     | 44,03      | 54,74  | 53,07 | Explosão violentíssima (ponte)                                                         |
|                                               | 3     | 42,25     |            | 33,14  |       | Explosão (ruptura nas juntas, entre o velho e a pasta)                                 |
|                                               | 4     |           | 43,20      |        | 45,53 | Ruptura violenta com descolamento na ponte com o velho e ruptura em parte do novo.     |
|                                               | 5     | 46,34     | 23,69      | 58,28  | 67,23 | Estalou bastante antes de romper normalmente no velho e depois no final da pte.        |
|                                               | 6     |           | 49,48      |        | 62,08 | Lascou e depois rompeu violentamente na ponte com o velho e no velho                   |
| Pasta cimentícia de METACALUM - 10% de adição | 1     | 33,25     |            | 58,21  |       | Ruptura monolítica (geral)                                                             |
|                                               | 2     | 34,36     | 36,75      | 33,03  | 49,61 | Ruptura monolítica (geral)                                                             |
|                                               | 3     | 42,63     |            | 41,00  |       | Ruptura monolítica (geral) com posterior descolamento da parte não apicoada (em baixo) |
|                                               | 4     |           | 41,05      |        | 41,72 | Estalou e rompeu normalmente na cabeça do cp, no novo com prosseguimento de fissuras   |
|                                               | 5     | 44,80     | 47,23      | 52,88  | 53,48 | Estalou antes de romper violentamente na ponte, com ruptura do agregado                |
|                                               | 6     |           | 46,11      |        | 63,45 | Estalou e lascou bastante antes da ruptura monolítica (geral), especialmente no novo   |
| Resina EPÓXI - superfície UMDA                | 1     | 32,10     |            | 58,21  |       | Explosão c/ desc. Na ponte (pasta), depois, ruptura no velho                           |
|                                               | 2     | 24,01     | 31,71      | 33,03  | 49,61 | ruptura monolítica suave, em todo o comprimento do cp                                  |
|                                               | 3     | 31,31     |            | 41,00  |       | Explosão com descolamento na junta (pasta)                                             |
|                                               | 4     |           | 40,25      |        | 41,72 | Explosão repentina com ruptura na ponte                                                |
|                                               | 5     | 38,53     | 37,35      | 52,88  | 53,48 | Estalou pouco antes de romper no adesivo, por descolamento. Explodiu                   |
|                                               | 6     |           | 37,99      |        | 63,45 | Ruptura violenta na ponte e embaixo do velho                                           |

Valores desconsiderados nos cálculos das médias. As médias se encontram à direita e à esquerda dos valores para os 3 e 28 dias, respectivamente

José Pinho:  
Média dos 3  
dias dos cp's  
de referência.

## 9 APÊNDICE B – Resistência à Compressão Axial dos Cp's do Concreto do Substrato.

### RUPTURA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CP'S DO ENSAIO DE ABRASÃO CONCRETO DO SUBSTRATO

| CP'S       | IDADE (dias) | CARGA (Kgf)     | TENSÃO (MPa)   |
|------------|--------------|-----------------|----------------|
| 1          | 28           | 27.090          | 34,49          |
| 2          | 28           | 25.863          | 32,93          |
| 3          | 28           | 24.508          | 31,20          |
| 4          | 28           | 22.165          | 28,22          |
| 5          | 28           | 21.836          | 27,80          |
| 6          | 28           | 21.050          | 26,80          |
| 7          | 28           | 20.891          | 26,60          |
| 8          | 28           | 20.825          | 26,52          |
| 9          | 28           | 19.358          | 24,65          |
| 10         | 28           | 18.572          | 23,65          |
| 11         | 28           | 18.380          | 23,40          |
| 12         | 28           | 17.921          | 22,82          |
| 13         | 28           | 17.726          | 22,57          |
| 14         | 28           | 17.689          | 22,52          |
| 15         | 28           | 17.509          | 22,29          |
| 16         | 28           | 17.329          | 22,06          |
| 17         | 28           | 17.165          | 21,86          |
| 18         | 28           | 17.120          | 21,80          |
| 19         | 28           | 17.060          | 21,72          |
| 20         | 28           | 17.022          | 21,67          |
| 21         | 28           | 16.977          | 21,62          |
| 22         | 28           | 16.588          | 21,12          |
| 23         | 28           | 16.408          | 20,89          |
| 24         | 28           | 16.086          | 20,48          |
| 25         | 28           | 15.218          | 19,38          |
| média =    |              | <b>19134,24</b> | <b>24,36</b>   |
| $\sigma =$ |              | 3134,6453       | <b>3,99047</b> |
| CV =       |              | <b>16,38%</b>   |                |

## 10 APÊNDICE C – Resistência à Compressão dos Materiais de Reparo aos 3, 7 e 28 Dias.

| MATERIAL                                              | CARGA DE RUPTURA (Kgf) |           |           | TENSÃO DE RUPTURA (MPa) |        |         |
|-------------------------------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-------------------------|--------|---------|
|                                                       | 3 DIAS                 | 7 DIAS    | 28 DIAS   | 3 DIAS                  | 7 DIAS | 28 DIAS |
| CONCRETO DE REFERÊNCIA, SEM ADIÇÃO (CAD 0%)           | 49.705,0               | 37.473,0* | 34.200,0* | 63,29                   | 47,71* | 43,54*  |
|                                                       | 49.877,0               | 48.612,0  | 43.500,0  | 63,51                   | 61,89  | 55,39   |
|                                                       | 49.720,0               | 50.817,0  | 48.500,0  | 63,31                   | 64,70  | 61,75   |
| MÉDIA =                                               | 49.767,3               | 49.714,5  | 46.000,0  | 63,37                   | 63,30  | 58,57   |
| D.P. =                                                | 95,3                   | 1.559,2   | 3.535,5   | 0,12                    | 1,99   | 4,50    |
| C.V. =                                                | 0,19%                  | 3,14%     | 7,69%     | 0,19%                   | 3,14%  | 7,69%   |
| CONCRETO COM ADIÇÃO DE 10% DE SÍLICA ATIVA (CAD S10%) | 38.963,0               | 56.095,0  | 57.347,0  | 49,61                   | 71,42  | 73,02   |
|                                                       | 45.632,0               | 49.458,0  | 47.639,0  | 58,10                   | 62,97  | 60,66   |
|                                                       | 41.605,0               | 56.853,0  | 52.774,0  | 52,97                   | 72,39  | 67,19   |
| MÉDIA =                                               | 42.066,7               | 54.135,3  | 52.586,7  | 53,56                   | 68,93  | 66,96   |
| D.P. =                                                | 3.358,4                | 4.068,4   | 4.856,7   | 4,28                    | 5,18   | 6,18    |
| C.V. =                                                | 7,98%                  | 7,52%     | 9,24%     | 7,98%                   | 7,52%  | 9,24%   |
| CONCRETO COM ADIÇÃO DE 10% DE METACALIM (CAD M10%)    | 41.200,0               | 31.000,0* | 59.810,0  | 52,46                   | 39,47* | 76,15   |
|                                                       | 45.200,0               | 55.000,0  | 56.764,0  | 57,55                   | 70,03  | 72,27   |
|                                                       | 25.000,0*              | 55.200,0  | 59.151,0  | 31,83*                  | 70,28  | 75,31   |
| MÉDIA =                                               | 43.200,0               | 55.100,0  | 58.575,0  | 55,01                   | 70,16  | 74,58   |
| D.P. =                                                | 2.828,4                | 141,4     | 1.602,6   | 3,60                    | 0,18   | 2,04    |
| C.V. =                                                | 6,55%                  | 0,26%     | 2,74%     | 6,55%                   | 0,26%  | 2,74%   |

\* Resultados desconsiderados nos cálculos estatísticos.

| MATERIAL                                     | CARGA DE RUPTURA (Kgf) |          |            | TENSÃO DE RUPTURA (MPa) |        |         |
|----------------------------------------------|------------------------|----------|------------|-------------------------|--------|---------|
|                                              | 3 DIAS                 | 7 DIAS   | 28 DIAS    | 3 DIAS                  | 7 DIAS | 28 DIAS |
| ARGAMASSA DE REFERÊNCIA (AAD 0%)             | 8.578,53               | 7.186,20 | 14.817,04  | 43,70                   | 36,61  | 75,48   |
|                                              | 8.593,50               | 8.451,27 | 13.547,27  | 43,78                   | 43,05  | 69,01   |
|                                              | --                     | 6.737,07 | 10.364,74* | --                      | 34,32  | 52,80*  |
| MÉDIA =                                      | 8.586,02               | 7.458,18 | 14.182,16  | 43,74                   | 37,99  | 72,25   |
| D.P. =                                       | 10,59                  | 888,88   | 897,86     | 0,06                    | 4,53   | 4,57    |
| C.V. =                                       | 0,12%                  | 11,92%   | 6,33%      | 0,13%                   | 11,91% | 6,33%   |
| ARGAMASSA COM 10% DE METACAU LIM (AAD M10%)  | 8.391,39               | 8.428,82 | 13.861,17  | 42,75                   | 42,94  | 70,61   |
|                                              | 8.466,25               | 8.406,36 | 14.062,67  | 43,13                   | 42,82  | 71,64   |
|                                              | --                     | 8.556,07 | 11.746,91* | --                      | 43,59  | 59,84*  |
| MÉDIA =                                      | 8.428,82               | 8.463,75 | 13.961,92  | 42,94                   | 43,12  | 71,13   |
| D.P. =                                       | 52,93                  | 80,74    | 142,48     | 0,27                    | 0,41   | 0,73    |
| C.V. =                                       | 0,63%                  | 0,95%    | 1,02%      | 0,63%                   | 0,96%  | 1,02%   |
| ARGAMASSA COM 10% DE SÍLICA ATIVA (AAD S10%) | 7.246,09               | 8.609,47 | 8.154,28*  | 36,91                   | 43,86  | 41,54*  |
|                                              | 8.466,25               | 8.660,87 | 14.321,89  | 43,13                   | 44,12  | 72,96   |
|                                              | 7.448,20               | 8.645,90 | 13.453,10  | 37,94                   | 44,04  | 68,53   |
| MÉDIA =                                      | 7.720,18               | 8.638,75 | 13.887,50  | 39,33                   | 44,01  | 70,75   |
| D.P. =                                       | 653,97                 | 26,44    | 614,33     | 3,33                    | 0,13   | 3,13    |
| C.V. =                                       | 8,47%                  | 0,31%    | 4,42%      | 8,48%                   | 0,30%  | 4,43%   |
| ARGAMASSA EPÓXI                              | 3.855,10               | 3.750,30 | 3.623,00   | 19,64                   | 19,10  | 18,46   |
|                                              | 4.169,49               | 4.244,35 | 3.778,94   | 21,24                   | 21,62  | 19,25   |
|                                              | 3.720,36               | 3.772,76 | 3.370,87   | 18,95                   | 19,22  | 17,17   |
| MÉDIA =                                      | 3.914,98               | 3922,47  | 3.590,94   | 19,94                   | 19,98  | 18,29   |
| D.P. =                                       | 230,48                 | 278,98   | 205,92     | 1,17                    | 1,42   | 1,05    |
| C.V. =                                       | 5,89%                  | 7,11%    | 5,73%      | 5,89%                   | 7,11%  | 5,74%   |

\* Resultados desconsiderados nos cálculos estatísticos.

# 11 APÊNDICE D – Planilha de Campo dos Ensaios de Abrasão aos 3 Dias.

| MATERIAL                                                          |                          | HORAS              |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |                    |                     |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
|                                                                   |                          | ZERO               |                     | 12                 |                     | 24                 |                     | 36                 |                     | 48                 |                     | 60                 |                     | 72                 |                     |
|                                                                   |                          | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>Rc</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>Rc</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>Rc</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>Rc</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>Rc</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>Rc</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>Rc</sub> (g) |
| ARGAMASSA EPÓXI (AE)                                              | CP 1                     | 15.206,0           | 8.548,0             | 15.206,0           | 8.548,0             | 15.196,0           | 8.537,0             | 15.200,0           | 8.546,0             | 15.204,0           | 8.548,0             | 15.212,0           | 8.555,0             | 15.204,0           | 8.546,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,658              | ADAt (mm)           | 6,658              | ADAt (mm)           | 6,659              | ADAt (mm)           | 6,654              | ADAt (mm)           | 6,656              | ADAt (mm)           | 6,657              | ADAt (mm)           | 6,658              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,000              | 0,000               | 0,000              | 0,000               | 0,004              | 0,057               | 0,002              | 0,028               | 0,001              | 0,014               | 0,000              | 0,000               |
|                                                                   | CP 2                     | 16.081,0           | 9.003,0             | 16.079,0           | 9.000,0             | 16.068,0           | 8.999,0             | 16.072,0           | 8.995,0             | 16.075,0           | 9.001,0             | 16.086,0           | 9.007,0             | 16.078,0           | 9.002,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 7,078              | ADAt (mm)           | 7,079              | ADAt (mm)           | 7,069              | ADAt (mm)           | 7,077              | ADAt (mm)           | 7,074              | ADAt (mm)           | 7,079              | ADAt (mm)           | 7,076              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,000              | 0,000               | 0,009              | 0,127               | 0,001              | 0,014               | 0,004              | 0,057               | 0,000              | 0,000               | 0,002              | 0,028               |
|                                                                   | CP 3                     | 14.742,0           | 8.211,0             | 14.742,0           | 8.211,0             | 14.733,0           | 8.205,0             | 14.739,0           | 8.208,0             | 14.740,0           | 8.212,0             | 14.740,0           | 8.212,0             | 14.742,0           | 8.215,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,531              | ADAt (mm)           | 6,531              | ADAt (mm)           | 6,528              | ADAt (mm)           | 6,531              | ADAt (mm)           | 6,528              | ADAt (mm)           | 6,528              | ADAt (mm)           | 6,527              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,000              | 0,000               | 0,003              | 0,042               | 0,000              | 0,000               | 0,003              | 0,042               | 0,003              | 0,042               | 0,004              | 0,057               |
| RESULTADOS GERAIS                                                 |                          | 0,000              | 0,000               | 0,000              | 0,000               | 0,004              | 0,057               | 0,002              | 0,024               | 0,003              | 0,042               | 0,001              | 0,019               | 0,002              | 0,028               |
| ARGAMASSA CIMENTÍCIA SEM ADIÇÃO DE POZOLANA (AAD 0%)              | CP 1                     | 14.636,0           | 8.194,0             | 14.467,0           | 8.099,0             | 14.061,0           | 7.882,0             | 13.664,0           | 7.669,0             | 13.468,0           | 7.559,0             | 13.422,0           | 7.538,0             | 13.383,0           | 7.521,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,442              | ADAt (mm)           | 6,368              | ADAt (mm)           | 6,179              | ADAt (mm)           | 5,995              | ADAt (mm)           | 5,909              | ADAt (mm)           | 5,884              | ADAt (mm)           | 5,862              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,074              | 1,047               | 0,263              | 3,721               | 0,447              | 6,324               | 0,533              | 7,540               | 0,558              | 7,894               | 0,580              | 8,205               |
|                                                                   | CP 2                     | 14.804,0           | 8.260,0             | 14.644,0           | 8.170,0             | 14.231,0           | 7.947,0             | 13.968,0           | 7.809,0             | 13.723,0           | 7.672,0             | 13.605,0           | 7.612,0             | 13.612,0           | 7.619,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,544              | ADAt (mm)           | 6,474              | ADAt (mm)           | 6,284              | ADAt (mm)           | 6,159              | ADAt (mm)           | 6,051              | ADAt (mm)           | 5,993              | ADAt (mm)           | 5,993              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,070              | 0,990               | 0,260              | 3,678               | 0,385              | 5,447               | 0,493              | 6,975               | 0,551              | 7,795               | 0,551              | 7,795               |
|                                                                   | CP 3                     | 14.743,0           | 8.290,0             | 14.483,0           | 8.146,0             | 13.840,0           | 7.809,0             | 13.486,0           | 7.624,0             | 13.334,0           | 7.543,0             | 13.206,0           | 7.479,0             | 13.136,0           | 7.442,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,453              | ADAt (mm)           | 6,337              | ADAt (mm)           | 6,031              | ADAt (mm)           | 5,862              | ADAt (mm)           | 5,791              | ADAt (mm)           | 5,727              | ADAt (mm)           | 5,694              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,116              | 1,641               | 0,422              | 5,970               | 0,591              | 8,361               | 0,662              | 9,365               | 0,726              | 10,271              | 0,759              | 10,738              |
| RESULTADOS GERAIS                                                 |                          | 0,000              | 0,000               | 0,087              | 1,226               | 0,315              | 4,456               | 0,474              | 6,710               | 0,563              | 7,360               | 0,612              | 8,653               | 0,630              | 8,913               |
| ARGAMASSA CIMENTÍCIA COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA (AAD S10%)        | CP 1                     | 16.292,0           | 9.190,0             | 16.239,0           | 9.167,0             | 16.160,0           | 9.114,0             | 16.079,0           | 9.071,0             | 15.956,0           | 9.004,0             | 15.819,0           | 8.930,0             | 15.665,0           | 8.841,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 7,102              | ADAt (mm)           | 7,072              | ADAt (mm)           | 7,046              | ADAt (mm)           | 7,008              | ADAt (mm)           | 6,952              | ADAt (mm)           | 6,889              | ADAt (mm)           | 6,824              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,030              | 0,424               | 0,056              | 0,792               | 0,094              | 1,330               | 0,150              | 2,122               | 0,213              | 3,013               | 0,278              | 3,933               |
|                                                                   | CP 2                     | 13.643,0           | 7.694,0             | 13.573,0           | 7.659,0             | 13.462,0           | 7.592,0             | 13.314,0           | 7.513,0             | 13.142,0           | 7.417,0             | 12.900,0           | 7.288,0             | 12.765,0           | 7.214,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 5,949              | ADAt (mm)           | 5,914              | ADAt (mm)           | 5,870              | ADAt (mm)           | 5,801              | ADAt (mm)           | 5,725              | ADAt (mm)           | 5,612              | ADAt (mm)           | 5,551              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,035              | 0,495               | 0,079              | 1,118               | 0,148              | 2,094               | 0,224              | 3,169               | 0,337              | 4,768               | 0,398              | 5,631               |
|                                                                   | CP 3                     | 14.122,0           | 7.954,0             | 14.063,0           | 7.932,0             | 13.976,0           | 7.880,0             | 13.869,0           | 7.822,0             | 13.735,0           | 7.749,0             | 13.597,0           | 7.673,0             | 13.424,0           | 7.580,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,168              | ADAt (mm)           | 6,131              | ADAt (mm)           | 6,096              | ADAt (mm)           | 6,047              | ADAt (mm)           | 5,986              | ADAt (mm)           | 5,924              | ADAt (mm)           | 5,844              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,037              | 0,523               | 0,072              | 1,019               | 0,121              | 1,712               | 0,182              | 2,575               | 0,244              | 3,452               | 0,324              | 4,584               |
| RESULTADOS GERAIS                                                 |                          | 0,000              | 0,000               | 0,034              | 0,481               | 0,069              | 0,976               | 0,121              | 1,712               | 0,185              | 2,622               | 0,265              | 3,744               | 0,333              | 4,716               |
| ARGAMASSA CIMENTÍCIA COM ADIÇÃO DE MCAR (AAD M10%)                | CP 1                     | 14.633,0           | 8.267,0             | 14.635,0           | 8.264,0             | 14.554,0           | 8.220,0             | 14.415,0           | 8.142,0             | 14.261,0           | 8.059,0             | 14.135,0           | 7.987,0             | 13.895,0           | 7.852,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,366              | ADAt (mm)           | 6,371              | ADAt (mm)           | 6,334              | ADAt (mm)           | 6,273              | ADAt (mm)           | 6,202              | ADAt (mm)           | 6,148              | ADAt (mm)           | 6,043              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,000              | 0,000               | 0,032              | 0,453               | 0,093              | 1,316               | 0,164              | 2,320               | 0,218              | 3,084               | 0,323              | 4,570               |
|                                                                   | CP 2                     | 13.888,0           | 7.827,0             | 13.834,0           | 7.798,0             | 13.772,0           | 7.763,0             | 13.679,0           | 7.711,0             | 13.542,0           | 7.637,0             | 13.395,0           | 7.549,0             | 13.218,0           | 7.455,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,061              | ADAt (mm)           | 6,036              | ADAt (mm)           | 6,009              | ADAt (mm)           | 5,968              | ADAt (mm)           | 5,905              | ADAt (mm)           | 5,846              | ADAt (mm)           | 5,763              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,025              | 0,354               | 0,052              | 0,736               | 0,093              | 1,316               | 0,156              | 2,207               | 0,215              | 3,042               | 0,298              | 4,216               |
|                                                                   | CP 3                     | 14.492,0           | 8.170,0             | 14.436,0           | 8.140,0             | 14.360,0           | 8.096,0             | 14.264,0           | 8.042,0             | 14.133,0           | 7.974,0             | 13.974,0           | 7.883,0             | 13.793,0           | 7.783,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,322              | ADAt (mm)           | 6,296              | ADAt (mm)           | 6,264              | ADAt (mm)           | 6,222              | ADAt (mm)           | 6,159              | ADAt (mm)           | 6,091              | ADAt (mm)           | 6,010              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,026              | 0,368               | 0,058              | 0,821               | 0,100              | 1,415               | 0,163              | 2,306               | 0,231              | 3,268               | 0,312              | 4,414               |
| RESULTADOS GERAIS                                                 |                          | 0,000              | 0,000               | 0,017              | 0,241               | 0,047              | 0,670               | 0,095              | 1,349               | 0,161              | 2,278               | 0,221              | 3,131               | 0,311              | 4,400               |
| CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO SEM ADIÇÃO DE POZOLANA (CAD 0%)       | CP 1                     | 15.212,0           | 8.803,0             | 15.133,0           | 8.758,0             | 15.038,0           | 8.701,0             | 14.963,0           | 8.660,0             | 14.887,0           | 8.616,0             | 14.809,0           | 8.572,0             | 14.720,0           | 8.519,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,409              | ADAt (mm)           | 6,375              | ADAt (mm)           | 6,337              | ADAt (mm)           | 6,303              | ADAt (mm)           | 6,271              | ADAt (mm)           | 6,237              | ADAt (mm)           | 6,201              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,034              | 0,481               | 0,072              | 1,019               | 0,106              | 1,500               | 0,138              | 1,952               | 0,172              | 2,433               | 0,208              | 2,943               |
|                                                                   | CP 2                     | 15.111,0           | 8.762,0             | 15.018,0           | 8.712,0             | 14.899,0           | 8.641,0             | 14.789,0           | 8.580,0             | 14.681,0           | 8.517,0             | 14.580,0           | 8.458,0             | 14.492,0           | 8.407,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,349              | ADAt (mm)           | 6,306              | ADAt (mm)           | 6,258              | ADAt (mm)           | 6,209              | ADAt (mm)           | 6,164              | ADAt (mm)           | 6,122              | ADAt (mm)           | 6,085              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,043              | 0,608               | 0,091              | 1,287               | 0,140              | 1,981               | 0,185              | 2,617               | 0,227              | 3,211               | 0,264              | 3,735               |
|                                                                   | CP 3                     | 14.571,0           | 8.408,0             | 14.486,0           | 8.364,0             | 14.387,0           | 8.304,0             | 14.288,0           | 8.248,0             | 14.196,0           | 8.196,0             | 14.096,0           | 8.142,0             | 13.982,0           | 8.075,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,163              | ADAt (mm)           | 6,122              | ADAt (mm)           | 6,083              | ADAt (mm)           | 6,040              | ADAt (mm)           | 6,000              | ADAt (mm)           | 5,954              | ADAt (mm)           | 5,907              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,041              | 0,580               | 0,080              | 1,132               | 0,123              | 1,740               | 0,163              | 2,306               | 0,209              | 2,957               | 0,256              | 3,622               |
| RESULTADOS GERAIS                                                 |                          | 0,000              | 0,000               | 0,039              | 0,556               | 0,081              | 1,146               | 0,123              | 1,740               | 0,162              | 2,292               | 0,203              | 2,867               | 0,243              | 3,433               |
| CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA (CAD S10%) | CP 1                     | 14.778,0           | 8.460,0             | 14.641,0           | 8.385,0             | 14.520,0           | 8.316,0             | 14.431,0           | 8.262,0             | 14.363,0           | 8.218,0             | 14.287,0           | 8.180,0             | 14.223,0           | 8.143,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,318              | ADAt (mm)           | 6,256              | ADAt (mm)           | 6,204              | ADAt (mm)           | 6,169              | ADAt (mm)           | 6,145              | ADAt (mm)           | 6,107              | ADAt (mm)           | 6,080              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,062              | 0,877               | 0,114              | 1,613               | 0,149              | 2,108               | 0,173              | 2,447               | 0,211              | 2,985               | 0,238              | 3,367               |
|                                                                   | CP 2                     | 14.720,0           | 8.440,0             | 14.590,0           | 8.368,0             | 14.490,0           | 8.312,0             | 14.406,0           | 8.262,0             | 14.326,0           | 8.218,0             | 14.244,0           | 8.169,0             | 14.173,0           | 8.126,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,280              | ADAt (mm)           | 6,222              | ADAt (mm)           | 6,178              | ADAt (mm)           | 6,144              | ADAt (mm)           | 6,108              | ADAt (mm)           | 6,075              | ADAt (mm)           | 6,047              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,058              | 0,821               | 0,102              | 1,443               | 0,136              | 1,924               | 0,172              | 2,433               | 0,205              | 2,900               | 0,233              | 3,296               |
|                                                                   | CP 3                     | 15.353,0           | 8.740,0             | 15.206,0           | 8.656,0             | 15.090,0           | 8.591,0             | 14.979,0           | 8.528,0             | 14.861,0           | 8.461,0             | 14.731,0           | 8.386,0             | 14.627,0           | 8.324,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,613              | ADAt (mm)           | 6,550              | ADAt (mm)           | 6,499              | ADAt (mm)           | 6,451              | ADAt (mm)           | 6,400              | ADAt (mm)           | 6,345              | ADAt (mm)           | 6,303              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,063              | 0,891               | 0,114              | 1,613               | 0,162              | 2,292               | 0,213              | 3,013               | 0,268              | 3,791               | 0,310              | 4,386               |
| RESULTADOS GERAIS                                                 |                          | 0,000              | 0,000               | 0,061              | 0,863               | 0,110              | 1,556               | 0,149              | 2,108               | 0,186              | 2,631               | 0,228              | 3,226               | 0,260              | 3,683               |
| CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE MCAR (CAD M10%)         | CP 1                     | 14.406,0           | 8.280,0             | 14.324,0           | 8.233,0             | 14.237,0           | 8.183,0             | 14.167,0           | 8.142,0             | 14.070,0           | 8.084,0             | 14.003,0           | 8.047,0             | 13.932,0           | 8.007,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,126              | ADAt (mm)           | 6,091              | ADAt (mm)           | 6,054              | ADAt (mm)           | 6,025              | ADAt (mm)           | 5,986              | ADAt (mm)           | 5,956              | ADAt (mm)           | 5,925              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,035              | 0,495               | 0,072              | 1,019               | 0,101              | 1,429               | 0,140              | 1,981               | 0,170              | 2,405               | 0,201              | 2,844               |
|                                                                   | CP 2                     | 14.956,0           | 8.872,0             | 14.862,0           | 8.618,0             | 14.768,0           | 8.565,0             | 14.681,0           | 8.514,0             | 14.599,0           | 8.467,0             | 14.515,0           | 8.417,0             | 14.441,0           | 8.376,0             |
|                                                                   | Volume (litros)          | 6,284              | ADAt (mm)           | 6,244              | ADAt (mm)           | 6,203              | ADAt (mm)           | 6,167              | ADAt (mm)           | 6,132              | ADAt (mm)           | 6,098              | ADAt (mm)           | 6,065              | ADAt (mm)           |
|                                                                   | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000               | 0,040              | 0,566               | 0,081              | 1,146               | 0,117              | 1,655               | 0,152              | 2,150               | 0,186              | 2,631               | 0,219              | 3,0                 |

## 12 APÊNDICE E – Planilha de Campo dos Ensaios de Abrasão aos 28 Dias.

| MATERIAL                                                           |                          | HORAS              |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                                                    |                          | ZERO               |                    | 12                 |                    | 24                 |                    | 36                 |                    | 48                 |                    | 60                 |                    | 72                 |                    |
|                                                                    |                          | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>R</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>R</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>R</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>R</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>R</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>R</sub> (g) | W <sub>A</sub> (g) | W <sub>R</sub> (g) |
| ARGAMASSA EPÓXI (AE)                                               | CP 1                     | 14.897,0           | 8.311,0            | 14.895,0           | 8.309,0            | 14.899,0           | 8.313,0            | 14.874,0           | 8.310,0            | 14.910,0           | 8.326,0            | 14.893,0           | 8.314,0            | 14.884,0           | 8.310,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,586              | ADAt (mm)          | 6,586              | ADAt (mm)          | 6,586              | ADAt (mm)          | 6,564              | ADAt (mm)          | 6,584              | ADAt (mm)          | 6,579              | ADAt (mm)          | 6,574              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 0,022              | 0,311              | 0,002              | 0,028              | 0,007              | 0,099              | 0,012              | 0,170              |
|                                                                    | CP 2                     | 15.067,0           | 8.406,0            | 15.064,0           | 8.402,0            | 15.070,0           | 8.409,0            | 15.051,0           | 8.404,0            | 15.082,0           | 8.420,0            | 15.061,0           | 8.408,0            | 15.055,0           | 8.401,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,661              | ADAt (mm)          | 6,662              | ADAt (mm)          | 6,661              | ADAt (mm)          | 6,647              | ADAt (mm)          | 6,662              | ADAt (mm)          | 6,653              | ADAt (mm)          | 6,654              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 0,014              | 0,198              | 0,000              | 0,000              | 0,008              | 0,113              | 0,007              | 0,099              |
|                                                                    | CP 3                     | 15.367,0           | 8.576,0            | 15.363,0           | 8.573,0            | 15.366,0           | 8.578,0            | 15.348,0           | 8.573,0            | 15.380,0           | 8.589,0            | 15.360,0           | 8.578,0            | 15.349,0           | 8.570,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,791              | ADAt (mm)          | 6,790              | ADAt (mm)          | 6,788              | ADAt (mm)          | 6,775              | ADAt (mm)          | 6,791              | ADAt (mm)          | 6,782              | ADAt (mm)          | 6,779              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,001              | 0,014              | 0,003              | 0,042              | 0,016              | 0,226              | 0,000              | 0,000              | 0,009              | 0,127              | 0,012              | 0,170              |
| RESULTADOS GERAIS                                                  |                          | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 0,005              | 0,001              | 0,014              | 0,017              | 0,245              | 0,001              | 0,009              | 0,008              | 0,113              | 0,010              | 0,146              |
| ARGAMASSA CIMENTÍCIA SEM ADIÇÃO DE POZOLANA (%)                    | CP 1                     | 15.820,0           | 8.961,0            | 15.748,0           | 8.919,0            | 15.636,0           | 8.842,0            | 15.469,0           | 8.763,0            | 15.298,0           | 8.668,0            | 15.132,0           | 8.574,0            | 14.988,0           | 8.495,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,859              | ADAt (mm)          | 6,829              | ADAt (mm)          | 6,794              | ADAt (mm)          | 6,706              | ADAt (mm)          | 6,630              | ADAt (mm)          | 6,558              | ADAt (mm)          | 6,493              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,030              | 0,424              | 0,065              | 0,920              | 0,153              | 2,165              | 0,229              | 3,240              | 0,301              | 4,258              | 0,366              | 5,178              |
|                                                                    | CP 2                     | 14.543,0           | 8.242,0            | 14.455,0           | 8.199,0            | 14.354,0           | 8.141,0            | 14.205,0           | 8.059,0            | 14.057,0           | 7.976,0            | 13.910,0           | 7.843,0            | 13.754,0           | 7.809,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,301              | ADAt (mm)          | 6,256              | ADAt (mm)          | 6,213              | ADAt (mm)          | 6,146              | ADAt (mm)          | 6,081              | ADAt (mm)          | 6,067              | ADAt (mm)          | 5,945              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,045              | 0,637              | 0,088              | 1,245              | 0,155              | 2,193              | 0,220              | 3,112              | 0,234              | 3,310              | 0,356              | 5,036              |
|                                                                    | CP 3                     | 14.604,0           | 8.265,0            | 14.494,0           | 8.204,0            | 14.374,0           | 8.137,0            | 14.197,0           | 8.039,0            | 14.016,0           | 7.938,0            | 13.840,0           | 7.843,0            | 13.687,0           | 7.756,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,339              | ADAt (mm)          | 6,290              | ADAt (mm)          | 6,237              | ADAt (mm)          | 6,158              | ADAt (mm)          | 6,078              | ADAt (mm)          | 5,997              | ADAt (mm)          | 5,931              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,049              | 0,693              | 0,102              | 1,443              | 0,181              | 2,561              | 0,261              | 3,692              | 0,342              | 4,838              | 0,408              | 5,772              |
| RESULTADOS GERAIS                                                  |                          | 0,000              | 0,000              | 0,041              | 0,585              | 0,085              | 1,203              | 0,163              | 2,306              | 0,237              | 3,348              | 0,292              | 4,136              | 0,377              | 5,329              |
| ARGAMASSA CIMENTÍCIA COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA (10%)              | CP 1                     | 14.011,0           | 7.900,0            | 13.966,0           | 7.870,0            | 13.930,0           | 7.853,0            | 13.871,0           | 7.821,0            | 13.748,0           | 7.744,0            | 13.643,0           | 7.694,0            | 13.532,0           | 7.630,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,111              | ADAt (mm)          | 6,096              | ADAt (mm)          | 6,077              | ADAt (mm)          | 6,050              | ADAt (mm)          | 6,004              | ADAt (mm)          | 5,949              | ADAt (mm)          | 5,902              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,015              | 0,212              | 0,034              | 0,481              | 0,061              | 0,863              | 0,107              | 1,514              | 0,162              | 2,292              | 0,209              | 2,957              |
|                                                                    | CP 2                     | 14.315,0           | 8.084,0            | 14.289,0           | 8.064,0            | 14.241,0           | 8.040,0            | 14.184,0           | 8.009,0            | 14.106,0           | 7.962,0            | 14.030,0           | 7.922,0            | 13.925,0           | 7.862,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,231              | ADAt (mm)          | 6,225              | ADAt (mm)          | 6,201              | ADAt (mm)          | 6,175              | ADAt (mm)          | 6,144              | ADAt (mm)          | 6,108              | ADAt (mm)          | 6,063              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,006              | 0,085              | 0,030              | 0,424              | 0,056              | 0,792              | 0,087              | 1,231              | 0,123              | 1,740              | 0,168              | 2,377              |
|                                                                    | CP 3                     | 15.573,0           | 8.792,0            | 15.514,0           | 8.751,0            | 15.940,0           | 7.852,0            | 15.342,0           | 8.660,0            | 15.178,0           | 8.564,0            | 15.055,0           | 8.497,0            | 14.901,0           | 8.410,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,781              | ADAt (mm)          | 6,763              | ADAt (mm)          | 6,688              | ADAt (mm)          | 6,682              | ADAt (mm)          | 6,614              | ADAt (mm)          | 6,558              | ADAt (mm)          | 6,491              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,018              | 0,255              | 0,693              | 9,804              | 0,099              | 1,401              | 0,167              | 2,363              | 0,223              | 3,155              | 0,290              | 4,103              |
| RESULTADOS GERAIS                                                  |                          | 0,000              | 0,000              | 0,013              | 0,184              | 0,032              | 0,453              | 0,072              | 1,019              | 0,120              | 1,702              | 0,169              | 2,396              | 0,222              | 3,145              |
| ARGAMASSA CIMENTÍCIA COM ADIÇÃO DE METACAULIM (10%)                | CP 1                     | 16.380,0           | 9.286,0            | 16.328,0           | 9.262,0            | 16.258,0           | 9.219,0            | 16.170,0           | 9.171,0            | 16.080,0           | 9.124,0            | 15.928,0           | 9.038,0            | 15.735,0           | 8.926,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 7,094              | ADAt (mm)          | 7,066              | ADAt (mm)          | 7,039              | ADAt (mm)          | 6,999              | ADAt (mm)          | 6,956              | ADAt (mm)          | 6,890              | ADAt (mm)          | 6,809              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,028              | 0,396              | 0,055              | 0,778              | 0,095              | 1,344              | 0,138              | 1,952              | 0,204              | 2,886              | 0,285              | 4,032              |
|                                                                    | CP 2                     | 14.982,0           | 8.538,0            | 14.946,0           | 8.520,0            | 14.883,0           | 8.482,0            | 14.803,0           | 8.437,0            | 14.686,0           | 8.375,0            | 14.561,0           | 8.303,0            | 14.420,0           | 8.220,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,444              | ADAt (mm)          | 6,426              | ADAt (mm)          | 6,401              | ADAt (mm)          | 6,366              | ADAt (mm)          | 6,311              | ADAt (mm)          | 6,258              | ADAt (mm)          | 6,200              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,018              | 0,255              | 0,043              | 0,608              | 0,078              | 1,103              | 0,133              | 1,882              | 0,186              | 2,631              | 0,244              | 3,452              |
|                                                                    | CP 3                     | 14.313,0           | 8.138,0            | 14.260,0           | 8.112,0            | 14.194,0           | 8.069,0            | 14.089,0           | 8.013,0            | 13.978,0           | 7.954,0            | 13.822,0           | 7.865,0            | 13.601,0           | 7.738,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,175              | ADAt (mm)          | 6,148              | ADAt (mm)          | 6,125              | ADAt (mm)          | 6,076              | ADAt (mm)          | 6,024              | ADAt (mm)          | 5,957              | ADAt (mm)          | 5,863              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,027              | 0,382              | 0,050              | 0,707              | 0,099              | 1,401              | 0,151              | 2,136              | 0,218              | 3,084              | 0,312              | 4,414              |
| RESULTADOS GERAIS                                                  |                          | 0,000              | 0,000              | 0,024              | 0,344              | 0,049              | 0,698              | 0,091              | 1,283              | 0,141              | 1,990              | 0,203              | 2,867              | 0,280              | 3,966              |
| CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO SEM ADIÇÃO DE POZOLANA (CAD 0%)        | CP 1                     | 15.249,0           | 8.819,0            | 15.208,0           | 8.793,0            | 15.137,0           | 8.758,0            | 15.046,0           | 8.701,0            | 14.955,0           | 8.650,0            | 14.851,0           | 8.586,0            | 14.760,0           | 8.537,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,430              | ADAt (mm)          | 6,415              | ADAt (mm)          | 6,379              | ADAt (mm)          | 6,345              | ADAt (mm)          | 6,305              | ADAt (mm)          | 6,265              | ADAt (mm)          | 6,223              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,015              | 0,212              | 0,051              | 0,722              | 0,085              | 1,203              | 0,125              | 1,768              | 0,165              | 2,334              | 0,207              | 2,928              |
|                                                                    | CP 2                     | 15.787,0           | 9.134,0            | 15.743,0           | 9.109,0            | 15.660,0           | 9.064,0            | 15.562,0           | 9.003,0            | 15.457,0           | 8.946,0            | 15.350,0           | 8.880,0            | 15.257,0           | 8.828,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,653              | ADAt (mm)          | 6,634              | ADAt (mm)          | 6,596              | ADAt (mm)          | 6,559              | ADAt (mm)          | 6,511              | ADAt (mm)          | 6,470              | ADAt (mm)          | 6,429              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,019              | 0,269              | 0,057              | 0,806              | 0,094              | 1,330              | 0,142              | 2,009              | 0,183              | 2,589              | 0,224              | 3,169              |
|                                                                    | CP 3                     | 16.514,0           | 9.583,0            | 16.456,0           | 9.525,0            | 16.356,0           | 9.467,0            | 16.231,0           | 9.390,0            | 16.106,0           | 9.320,0            | 15.984,0           | 9.244,0            | 15.874,0           | 9.181,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,931              | ADAt (mm)          | 6,931              | ADAt (mm)          | 6,889              | ADAt (mm)          | 6,841              | ADAt (mm)          | 6,786              | ADAt (mm)          | 6,740              | ADAt (mm)          | 6,693              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 0,042              | 0,594              | 0,090              | 1,273              | 0,145              | 2,051              | 0,191              | 2,702              | 0,238              | 3,367              |
| RESULTADOS GERAIS                                                  |                          | 0,000              | 0,000              | 0,011              | 0,160              | 0,050              | 0,707              | 0,090              | 1,269              | 0,137              | 1,943              | 0,180              | 2,542              | 0,223              | 3,155              |
| CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA (CAD S 10%) | CP 1                     | 16.544,0           | 9.442,0            | 16.462,0           | 9.395,0            | 16.387,0           | 9.354,0            | 16.312,0           | 9.314,0            | 16.236,0           | 9.272,0            | 16.149,0           | 9.217,0            | 16.089,0           | 9.186,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 7,102              | ADAt (mm)          | 7,067              | ADAt (mm)          | 7,033              | ADAt (mm)          | 6,998              | ADAt (mm)          | 6,964              | ADAt (mm)          | 6,932              | ADAt (mm)          | 6,903              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,035              | 0,495              | 0,069              | 0,976              | 0,104              | 1,471              | 0,138              | 1,952              | 0,170              | 2,405              | 0,199              | 2,815              |
|                                                                    | CP 2                     | 16.172,0           | 9.270,0            | 16.087,0           | 9.221,0            | 16.011,0           | 9.180,0            | 15.928,0           | 9.133,0            | 15.846,0           | 9.088,0            | 15.751,0           | 9.030,0            | 15.679,0           | 8.989,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,902              | ADAt (mm)          | 6,866              | ADAt (mm)          | 6,831              | ADAt (mm)          | 6,795              | ADAt (mm)          | 6,758              | ADAt (mm)          | 6,721              | ADAt (mm)          | 6,690              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,036              | 0,509              | 0,071              | 1,004              | 0,107              | 1,514              | 0,144              | 2,037              | 0,181              | 2,561              | 0,212              | 2,999              |
|                                                                    | CP 3                     | 15.517,0           | 8.848,0            | 15.439,0           | 8.803,0            | 15.350,0           | 8.754,0            | 15.263,0           | 8.705,0            | 15.175,0           | 8.655,0            | 15.072,0           | 8.597,0            | 14.992,0           | 8.549,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,669              | ADAt (mm)          | 6,636              | ADAt (mm)          | 6,596              | ADAt (mm)          | 6,558              | ADAt (mm)          | 6,520              | ADAt (mm)          | 6,475              | ADAt (mm)          | 6,443              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,033              | 0,467              | 0,073              | 1,033              | 0,111              | 1,570              | 0,149              | 2,108              | 0,194              | 2,745              | 0,226              | 3,197              |
| RESULTADOS GERAIS                                                  |                          | 0,000              | 0,000              | 0,035              | 0,490              | 0,071              | 1,004              | 0,107              | 1,518              | 0,144              | 2,032              | 0,182              | 2,570              | 0,212              | 3,004              |
| CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO COM ADIÇÃO DE METACAULIM (CAD M 10%)   | CP 1                     | 14.088,0           | 8.141,0            | 14.029,0           | 8.111,0            | 13.918,0           | 8.048,0            | 13.827,0           | 7.994,0            | 13.707,0           | 7.924,0            | 13.584,0           | 7.852,0            | 13.474,0           | 7.791,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 5,947              | ADAt (mm)          | 5,918              | ADAt (mm)          | 5,870              | ADAt (mm)          | 5,833              | ADAt (mm)          | 5,783              | ADAt (mm)          | 5,732              | ADAt (mm)          | 5,683              | ADAt (mm)          |
|                                                                    | VL <sub>i</sub> (litros) | 0,000              | 0,000              | 0,029              | 0,410              | 0,077              | 1,089              | 0,114              | 1,613              | 0,164              | 2,320              | 0,215              | 3,042              | 0,264              | 3,735              |
|                                                                    | CP 2                     | 14.633,0           | 8.481,0            | 14.578,0           | 8.451,0            | 14.498,0           | 8.407,0            | 14.416,0           | 8.359,0            | 14.320,0           | 8.304,0            | 14.234,0           | 8.252,0            | 14.139,0           | 8.199,0            |
|                                                                    | Volume (litros)          | 6,152              | ADAt (mm)          | 6,127              | ADAt (mm)          | 6,091              | ADAt (mm)          | 6,057              | ADAt (mm)          | 6,016              | ADAt (mm)          | 5,982              | ADAt (mm)          | 5,940              | ADAt (             |



## 13 APÊNDICE F – Análises de Variância (ANOVA) de Fator Único dos resultados de Abrasão Para os Materiais de Reparo.

Anova: fator único - entre ARGAMASSAS, aos 3 dias.

### RESUMO

| Grupo              | Contagem | Soma     | Média    | Variância |
|--------------------|----------|----------|----------|-----------|
| AE (3 dias)        | 3        | 0,084883 | 0,028294 | 0,000801  |
| AAD 0% (3 dias)    | 3        | 26,73803 | 8,912677 | 2,539984  |
| AAD S 10% (3 dias) | 3        | 14,14711 | 4,715702 | 0,733582  |
| AAD M 10% (3 dias) | 3        | 13,19925 | 4,39975  | 0,031422  |

### ANOVA

| Fonte da variação | SQ       | gl | MQ       | F        | valor-P     | F crítico |
|-------------------|----------|----|----------|----------|-------------|-----------|
| Entre grupos      | 118,571  | 3  | 39,52365 | 47,82356 | 1,87399E-05 | 4,066181  |
| Dentro dos grupos | 6,611578 | 8  | 0,826447 |          |             |           |
| Total             | 125,1825 | 11 |          |          |             |           |

**F >> F<sub>crítico</sub> , logo, há diferenças significativas entre os grupos.**

### TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)

Nº DE TRATAMENTOS = 4

GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 8

PELA TABELA DE "Q" q = 4,53

Assim, a d.m.s. = **2,377635** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|                       |                 |    |                                                                                                      |
|-----------------------|-----------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AAD 0% - AAD S 10%    | <b>4,196975</b> | mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AAD 0% - AAD M 10%    | <b>4,512927</b> | mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AAD S 10% - AAD M 10% | 0,315952        | mm | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| AE - AAD 0%           | <b>8,884383</b> | mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AE - AAD S 10%        | <b>4,687408</b> | mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AE - AAD M 10%        | <b>4,371456</b> | mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |

Anova: fator único - entre CONCRETOS, aos 3 dias.

#### RESUMO

| <i>Grupo</i>       | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i> | <i>Média</i> | <i>Variância</i> |
|--------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| CAD 0% (3 dias)    | 3               | 10,29909    | 3,433031     | 0,183596         |
| CAD S 10% (3 dias) | 3               | 11,04889    | 3,682963     | 0,371528         |
| CAD M 10% (3 dias) | 3               | 9,563444    | 3,187815     | 0,157377         |

#### ANOVA

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos             | 0,367769  | 2         | 0,183885  | 0,774251 | 0,502194       | 5,143253         |
| Dentro dos grupos        | 1,425001  | 6         | 0,2375    |          |                |                  |
| Total                    | 1,792771  | 8         |           |          |                |                  |

**F << F<sub>crítico</sub> , logo, não há diferenças significativas entre os grupos. (as médias podem ser consideradas IGUAIS)**

#### TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)

Nº DE TRATAMENTOS = 3

GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 6

PELA TABELA DE "Q" q = 4,34

Assim, a d.m.s. = **1,221128** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|                       |             |                                                               |
|-----------------------|-------------|---------------------------------------------------------------|
| AAD 0% - AAD S 10%    | 0,249932 mm | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AAD 0% - AAD M 10%    | 0,245217 mm | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AAD S 10% - AAD M 10% | 0,495149 mm | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |

**Anova: fator único – Comparação entre CONCRETOS E ARGAMASSAS aos 3 dias.**

**RESUMO**

| <i>Grupo</i>       | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i> | <i>Média</i> | <i>Variância</i> |
|--------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| AAD 0% (3 dias)    | 3               | 26,73803    | 8,912677     | 2,539984         |
| AAD S 10% (3 dias) | 3               | 14,14711    | 4,715702     | 0,733582         |
| AAD M 10% (3 dias) | 3               | 13,19925    | 4,39975      | 0,031422         |
| CAD 0% (3 dias)    | 3               | 10,29909    | 3,433031     | 0,183596         |
| CAD S 10% (3 dias) | 3               | 11,04889    | 3,682963     | 0,371528         |
| CAD M 10% (3 dias) | 3               | 9,563444    | 3,187815     | 0,157377         |

**ANOVA**

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos             | 68,28126  | 5         | 13,65625  | 20,3952  | 1,73321E-05    | 3,105875         |
| Dentro dos grupos        | 8,034978  | 12        | 0,669582  |          |                |                  |
| Total                    | 76,31624  | 17        |           |          |                |                  |

**F >> F<sub>crítico</sub> , logo, há diferenças significativas entre os grupos.**

**TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)**

Nº DE TRATAMENTOS = 6  
GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 12

PELA TABELA DE "Q" q = 4,75

Assim, a d.m.s. = **2,244061** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|                       |                    |                                                                                                      |
|-----------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AAD 0% - CAD 0%       | <b>5,479646</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AAD S 10% - CAD S 10% | 1,032739 mm        | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| AAD M 10% - CAD M 10% | 1,211935 mm        | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |

Anova: fator único - entre ARGAMASSAS, aos 28 dias.

#### RESUMO

| Grupo               | Contagem | Soma   | Média    | Variância |
|---------------------|----------|--------|----------|-----------|
| AE (28 dias)        | 3        | 0,439  | 0,146333 | 0,00168   |
| AAD 0% (28 dias)    | 3        | 15,986 | 5,328667 | 0,152449  |
| AAD S 10% (28 dias) | 3        | 9,437  | 3,145667 | 0,771465  |
| AAD M 10% (28 dias) | 3        | 11,898 | 3,966    | 0,234628  |

#### ANOVA

| Fonte da variação | SQ       | gl | MQ       | F        | valor-P     | F crítico |
|-------------------|----------|----|----------|----------|-------------|-----------|
| Entre grupos      | 43,3033  | 3  | 14,43443 | 49,76434 | 1,61287E-05 | 4,066181  |
| Dentro dos grupos | 2,320446 | 8  | 0,290056 |          |             |           |
| Total             | 45,62374 | 11 |          |          |             |           |

**F >> F<sub>crítico</sub> , logo, há diferenças significativas entre os grupos.**

#### TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)

Nº DE TRATAMENTOS = 4  
GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 8

PELA TABELA DE "Q" q = 4,53

Assim, a d.m.s. = **1,40857** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|                       |                    |                                                                                                      |
|-----------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AAD 0% - AAD S 10%    | <b>2,183</b> mm    | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AAD 0% - AAD M 10%    | 1,362667 mm        | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| AAD S 10% - AAD M 10% | 0,820333 mm        | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| AE - AAD 0%           | <b>5,182333</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AE - AAD S 10%        | <b>2,999333</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AE - AAD M 10%        | <b>3,819667</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |

Anova: fator único - entre CONCRETOS, aos 28 dias.

#### RESUMO

| <i>Grupo</i>        | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i> | <i>Média</i> | <i>Variância</i> |
|---------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| CAD 0% (28 dias)    | 3               | 9,464       | 3,154667     | 0,048334         |
| CAD S 10% (28 dias) | 3               | 9,011       | 3,003667     | 0,036497         |
| CAD M 10% (28 dias) | 3               | 10,483      | 3,494333     | 0,184065         |

#### ANOVA

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos             | 0,378928  | 2         | 0,189464  | 2,113792 | 0,201899       | 5,143253         |
| Dentro dos grupos        | 0,537794  | 6         | 0,089632  |          |                |                  |
| Total                    | 0,916722  | 8         |           |          |                |                  |

**F < F<sub>crítico</sub> , logo, não há diferenças significativas entre os grupos. (as médias podem ser consideradas IGUAIS)**

#### TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)

Nº DE TRATAMENTOS = 3

GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 6

PELA TABELA DE "Q" q = 4,34

Assim, a d.m.s. = **0,750173** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|                       |             |                                                               |
|-----------------------|-------------|---------------------------------------------------------------|
| AAD 0% - AAD S 10%    | 0,151 mm    | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AAD 0% - AAD M 10%    | 0,339667 mm | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AAD S 10% - AAD M 10% | 0,490667 mm | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |

**Anova: fator único – Comparação entre CONCRETOS E ARGAMASSAS aos 28 dias.**
**RESUMO**

| <i>Grupo</i>        | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i> | <i>Média</i> | <i>Variância</i> |
|---------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| AAD 0% (28 dias)    | 3               | 15,986      | 5,328667     | 0,152449         |
| AAD S 10% (28 dias) | 3               | 9,437       | 3,145667     | 0,771465         |
| AAD M 10% (28 dias) | 3               | 11,898      | 3,966        | 0,234628         |
| CAD 0% (28 dias)    | 3               | 9,464       | 3,154667     | 0,048334         |
| CAD S 10% (28 dias) | 3               | 9,011       | 3,003667     | 0,036497         |
| CAD M 10% (28 dias) | 3               | 10,483      | 3,494333     | 0,184065         |

**ANOVA**

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos             | 11,55977  | 5         | 2,311953  | 9,717903 | 0,00066969     | 3,105875         |
| Dentro dos grupos        | 2,854879  | 12        | 0,237907  |          |                |                  |
| Total                    | 14,41465  | 17        |           |          |                |                  |

**F >> F<sub>crítico</sub>, logo, há diferenças significativas entre os grupos.**

**TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)**

Nº DE TRATAMENTOS = 6  
 GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 12

PELA TABELA DE "Q" q = 4,75

Assim, a d.m.s. = **1,337631** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|                       |                 |                                                                                                      |
|-----------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AAD 0% - CAD 0%       | <b>2,174</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AAD S 10% - CAD S 10% | 0,142 mm        | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| AAD M 10% - CAD M 10% | 0,471667 mm     | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |

**Anova: fator único – Verificação da influência da IDADE nas ARGAMASSAS.****RESUMO**

| <i>Grupo</i>        | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i> | <i>Média</i> | <i>Variância</i> |
|---------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| AE (3 dias)         | 3               | 0,084883    | 0,028294     | 0,000801         |
| AAD 0% (3 dias)     | 3               | 26,73803    | 8,912677     | 2,539984         |
| AAD S 10% (3 dias)  | 3               | 14,14711    | 4,715702     | 0,733582         |
| AAD M 10% (3 dias)  | 3               | 13,19925    | 4,39975      | 0,031422         |
| AE (28 dias)        | 3               | 0,439       | 0,146333     | 0,00168          |
| AAD 0% (28 dias)    | 3               | 15,986      | 5,328667     | 0,152449         |
| AAD S 10% (28 dias) | 3               | 9,437       | 3,145667     | 0,771465         |
| AAD M 10% (28 dias) | 3               | 11,898      | 3,966        | 0,234628         |

**ANOVA**

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos             | 173,0936  | 7         | 24,72766  | 44,29483 | 2,6703E-09     | 2,657197         |
| Dentro dos grupos        | 8,932024  | 16        | 0,558252  |          |                |                  |
| Total                    | 182,0256  | 23        |           |          |                |                  |

**F >> F<sub>crítico</sub> , logo, há diferenças significativas entre os grupos.**

**TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)**

Nº DE TRATAMENTOS = 8  
 GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 16

PELA TABELA DE "Q" q = 4,90

Assim, a d.m.s. = **2,113734** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|                                          |                   |                                                                                                      |
|------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AAD 0% (3 dias) - AAD 0% (28 dias)       | <b>3,58401</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| AAD S 10% (3 dias) - AAD S 10% (28 dias) | 1,570035 mm       | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| AAD M 10% (3 dias) - AAD M 10% (28 dias) | 0,43375 mm        | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| AE (3 dias) - AE (28 dias)               | 0,118039 mm       | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |

**Anova: fator único – Verificação da influência da IDADE nos CONCRETOS.****RESUMO**

| <i>Grupo</i>        | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i> | <i>Média</i> | <i>Variância</i> |
|---------------------|-----------------|-------------|--------------|------------------|
| CAD 0% (3 dias)     | 3               | 10,299093   | 3,4330311    | 0,1835957        |
| CAD S 10% (3 dias)  | 3               | 11,04889    | 3,6829633    | 0,3715277        |
| CAD M 10% (3 dias)  | 3               | 9,5634437   | 3,1878146    | 0,1573772        |
| CAD 0% (28 dias)    | 3               | 9,464       | 3,1546667    | 0,0483343        |
| CAD S 10% (28 dias) | 3               | 9,011       | 3,0036667    | 0,0364973        |
| CAD M 10% (28 dias) | 3               | 10,483      | 3,4943333    | 0,1840653        |

**ANOVA**

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i>  | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|------------------|
| Entre grupos             | 0,9586908 | 5         | 0,1917382 | 1,1722354 | 0,3776655      | 3,1058752        |
| Dentro dos grupos        | 1,9627951 | 12        | 0,1635663 |           |                |                  |
| Total                    | 2,921486  | 17        |           |           |                |                  |

**F << F<sub>crítico</sub> , logo, não há diferenças significativas entre os grupos. (as médias podem ser consideradas IGUAIS)**

**TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)**

Nº DE TRATAMENTOS = 6  
 GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 12

PELA TABELA DE "Q" q = 4,75

Assim, a d.m.s. = **1,1091233** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|                                          |              |                                                               |
|------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------|
| CAD 0% (3 dias) - CAD 0% (28 dias)       | 0,2499322 mm | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| CAD S 10% (3 dias) - CAD S 10% (28 dias) | 0,2452165 mm | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| CAD M 10% (3 dias) - CAD M 10% (28 dias) | 0,4951487 mm | AS MÉDIAS DAS ARGAMASSAS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |



## 14 APÊNDICE G – Análises de Variância (ANOVA) de Fator Único dos Resultados de Velocidade de Abrasão Para os Concretos de Reparo.

Anova: fator único – Verificação da constância da VELOCIDADE de abrasão do CAD 0% aos 3 dias.

### RESUMO

| Grupo    | Contagem | Soma (mm) | Média (mm) | Variância |
|----------|----------|-----------|------------|-----------|
| 12 horas | 3        | 0,1391132 | 0,0463711  | 3,104E-05 |
| 24 horas | 3        | 0,1432394 | 0,0477465  | 3,162E-05 |
| 36 horas | 3        | 0,1450078 | 0,0483359  | 4,463E-05 |
| 48 horas | 3        | 0,1432394 | 0,0477465  | 4,804E-05 |
| 60 horas | 3        | 0,1433573 | 0,0477858  | 4,372E-05 |
| 72 horas | 3        | 0,143043  | 0,047681   | 3,542E-05 |

### ANOVA

| Fonte da variação | SQ        | gl | MQ        | F         | valor-P   | F crítico |
|-------------------|-----------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Entre grupos      | 6,405E-06 | 5  | 1,281E-06 | 0,0327839 | 0,9992931 | 3,1058752 |
| Dentro dos grupos | 0,0004689 | 12 | 3,908E-05 |           |           |           |
| Total             | 0,0004753 | 17 |           |           |           |           |

**F << Fcrítico , logo, não há diferenças significativas entre os grupos. (as médias podem ser consideradas IGUAIS)**

### TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)

Nº DE TRATAMENTOS = 6  
GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 12

PELA TABELA DE "Q" q = 4,75

Assim, a d.m.s. = **0,0171432** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|             |              |                                                              |
|-------------|--------------|--------------------------------------------------------------|
| Entre 12-24 | 0,0013754 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-36 | 0,0019649 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-48 | 0,0013754 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-60 | 0,0014147 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-72 | 0,0013099 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |

Anova: fator único – Verificação da constância da VELOCIDADE de abrasão do CAD S10% aos 3 dias.

#### RESUMO

| Grupo    | Contagem | Soma (mm) | Média (mm) | Variância |
|----------|----------|-----------|------------|-----------|
| 12 horas | 3        | 0,2157434 | 0,0719145  | 9,729E-06 |
| 24 horas | 3        | 0,1945227 | 0,0648409  | 1,668E-05 |
| 36 horas | 3        | 0,1756599 | 0,0585533  | 2,61E-05  |
| 48 horas | 3        | 0,1644601 | 0,05482    | 4,752E-05 |
| 60 horas | 3        | 0,161277  | 0,053759   | 6,721E-05 |
| 72 horas | 3        | 0,1534568 | 0,0511523  | 7,167E-05 |

#### ANOVA

| Fonte da variação | SQ        | gl | MQ        | F         | valor-P   | F crítico |
|-------------------|-----------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Entre grupos      | 0,0009223 | 5  | 0,0001845 | 4,6328398 | 0,0137996 | 3,1058752 |
| Dentro dos grupos | 0,0004778 | 12 | 3,982E-05 |           |           |           |
| Total             | 0,0014001 | 17 |           |           |           |           |

**F >> Fcrítico , logo, HÁ diferenças significativas entre os grupos. (as médias podem ser consideradas DIFERENTES)**

#### TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)

Nº DE TRATAMENTOS = 6  
GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 12

PELA TABELA DE "Q" q = 4,75

Assim, a d.m.s. = **0,0173049** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|             |                     |                                                                                                     |
|-------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Entre 12-24 | 0,0070736 mm        | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| Entre 12-36 | 0,0133612 mm        | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| Entre 12-48 | 0,0170944 mm        | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| Entre 12-60 | <b>0,0181555</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DOS CONCRETOS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-72 | <b>0,0207622</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DOS CONCRETOS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |

Anova: fator único – Verificação da constância da VELOCIDADE de abrasão do CAD M10% aos 3 dias.

#### RESUMO

| <i>Grupo</i> | <i>Contagem</i> | <i>Soma (mm)</i> | <i>Média (mm)</i> | <i>Variância</i> |
|--------------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|
| 12 horas     | 3               | 0,1402921        | 0,046764          | 2,826E-05        |
| 24 horas     | 3               | 0,1391132        | 0,0463711         | 1,193E-05        |
| 36 horas     | 3               | 0,1367554        | 0,0455851         | 3,258E-05        |
| 48 horas     | 3               | 0,1367554        | 0,0455851         | 2,27E-05         |
| 60 horas     | 3               | 0,1329828        | 0,0443276         | 2,024E-05        |
| 72 horas     | 3               | 0,1328256        | 0,0442752         | 3,036E-05        |

#### ANOVA

| <i>Fonte da variação</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i>  | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|------------------|
| Entre grupos             | 1,573E-05 | 5         | 3,147E-06 | 0,1292492 | 0,9827281      | 3,1058752        |
| Dentro dos grupos        | 0,0002921 | 12        | 2,435E-05 |           |                |                  |
| Total                    | 0,0003079 | 17        |           |           |                |                  |

**F << Fcrítico , logo, não há diferenças significativas entre os grupos. (as médias podem ser consideradas IGUAIS)**

#### TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)

Nº DE TRATAMENTOS = 6  
GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 12

PELA TABELA DE "Q" q = 4,75

Assim, a d.m.s. = **0,0135313** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|             |              |                                                              |
|-------------|--------------|--------------------------------------------------------------|
| Entre 12-24 | 0,000393 mm  | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-36 | 0,0011789 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-48 | 0,0011789 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-60 | 0,0024364 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-72 | 0,0024888 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |

Anova: fator único – Verificação da constância da VELOCIDADE de abrasão do CAD 0% aos 28 dias.

## RESUMO

| Grupo    | Contagem | Soma (mm) | Média (mm) | Variância |
|----------|----------|-----------|------------|-----------|
| 12 horas | 3        | 0,0400835 | 0,0133612  | 0,0001394 |
| 24 horas | 3        | 0,0884194 | 0,0294731  | 1,981E-05 |
| 36 horas | 3        | 0,1057103 | 0,0352368  | 3,14E-06  |
| 48 horas | 3        | 0,1214293 | 0,0404764  | 1,011E-05 |
| 60 horas | 3        | 0,1270882 | 0,0423627  | 9,859E-06 |
| 72 horas | 3        | 0,1314502 | 0,0438167  | 9,304E-06 |

## ANOVA

| Fonte da variação | SQ        | gl | MQ        | F         | valor-P   | F crítico |
|-------------------|-----------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Entre grupos      | 0,0019684 | 5  | 0,0003937 | 12,324253 | 0,0002195 | 3,1058752 |
| Dentro dos grupos | 0,0003833 | 12 | 3,194E-05 |           |           |           |
| Total             | 0,0023518 | 17 |           |           |           |           |

**F >> Fcrítico , logo, HÁ diferenças significativas entre os grupos. (as médias podem ser consideradas DIFERENTES)**

## TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)

Nº DE TRATAMENTOS = 6  
GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 12

PELA TABELA DE "Q" q = 4,75

Assim, a d.m.s. = **0,0154999** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|             |                     |                                                                                                     |
|-------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Entre 12-24 | <b>0,016112</b> mm  | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DOS CONCRETOS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-36 | <b>0,0218756</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DOS CONCRETOS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-48 | <b>0,0271153</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DOS CONCRETOS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-60 | <b>0,0290016</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DOS CONCRETOS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-72 | <b>0,0304556</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DOS CONCRETOS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |

Anova: fator único – Verificação da constância da VELOCIDADE de abrasão do CAD S10% aos 28 dias.

## RESUMO

| Grupo    | Contagem | Soma (mm) | Média (mm) | Variância |
|----------|----------|-----------|------------|-----------|
| 12 horas | 3        | 0,1226083 | 0,0408694  | 3,243E-06 |
| 24 horas | 3        | 0,1255556 | 0,0418519  | 1,39E-06  |
| 36 horas | 3        | 0,126538  | 0,0421793  | 1,905E-06 |
| 48 horas | 3        | 0,1270292 | 0,0423431  | 2,635E-06 |
| 60 horas | 3        | 0,1285029 | 0,0428343  | 8,024E-06 |
| 72 horas | 3        | 0,1251626 | 0,0417209  | 7,039E-06 |

## ANOVA

| Fonte da variação | SQ        | gl | MQ        | F         | valor-P  | F crítico |
|-------------------|-----------|----|-----------|-----------|----------|-----------|
| Entre grupos      | 6,652E-06 | 5  | 1,33E-06  | 0,3293474 | 0,885661 | 3,1058752 |
| Dentro dos grupos | 4,847E-05 | 12 | 4,039E-06 |           |          |           |
| Total             | 5,512E-05 | 17 |           |           |          |           |

**F << Fcrítico , logo, não há diferenças significativas entre os grupos. (as médias podem ser consideradas IGUAIS)**

## TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)

Nº DE TRATAMENTOS = 6  
GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 12

PELA TABELA DE "Q" q = 4,75

Assim, a d.m.s. = **0,0055117** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|             |              |                                                              |
|-------------|--------------|--------------------------------------------------------------|
| Entre 12-24 | 0,0009824 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-36 | 0,0013099 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-48 | 0,0014737 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-60 | 0,0019649 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-72 | 0,0008514 mm | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |

Anova: fator único – Verificação da constância da VELOCIDADE de abrasão do CAD M10% aos 28 dias.

## RESUMO

| Grupo    | Contagem | Soma (mm) | Média (mm) | Variância |
|----------|----------|-----------|------------|-----------|
| 12 horas | 3        | 0,0919562 | 0,0306521  | 9,729E-06 |
| 24 horas | 3        | 0,1190715 | 0,0396905  | 2,513E-05 |
| 36 horas | 3        | 0,1253591 | 0,0417864  | 1,549E-05 |
| 48 horas | 3        | 0,1346922 | 0,0448974  | 1,844E-05 |
| 60 horas | 3        | 0,1402921 | 0,046764   | 3,382E-05 |
| 72 horas | 3        | 0,1455973 | 0,0485324  | 3,548E-05 |

## ANOVA

| Fonte da variação | SQ        | gl | MQ        | F         | valor-P  | F crítico |
|-------------------|-----------|----|-----------|-----------|----------|-----------|
| Entre grupos      | 0,0006237 | 5  | 0,0001247 | 5,4195224 | 0,007762 | 3,1058752 |
| Dentro dos grupos | 0,0002762 | 12 | 2,302E-05 |           |          |           |
| Total             | 0,0008999 | 17 |           |           |          |           |

**F >> Fcrítico , logo, HÁ diferenças significativas entre os grupos. (as médias podem ser consideradas DIFERENTES)**

## TESTE DE TUKEY (para saber entre quais grupos há diferenças significativas)

Nº DE TRATAMENTOS = 6  
GRAUS DE LIBERDADE DO RESÍDUO = 12

PELA TABELA DE "Q" q = 4,75

Assim, a d.m.s. = **0,013157** mm

Logo, combinando as médias duas a duas, têm-se (em valores absolutos):

|             |                     |                                                                                                     |
|-------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Entre 12-24 | 0,0090384 mm        | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| Entre 12-36 | 0,0111343 mm        | AS MÉDIAS DOS CONCRETOS NÃO SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES!                                        |
| Entre 12-48 | <b>0,0142453</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DOS CONCRETOS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-60 | <b>0,016112</b> mm  | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DOS CONCRETOS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |
| Entre 12-72 | <b>0,0178804</b> mm | MAIOR QUE A DIFERENÇA MÍNIMA SIGNIFICANTE: AS MÉDIAS DOS CONCRETOS SÃO ESTATÍSTICAMENTE DIFERENTES! |