



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
Área de Estruturas

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO NA TOMADA D'ÁGUA DA  
UHE JAGUARI POR MEIO DE ENSAIOS LABORATORIAIS**

**ENG<sup>a</sup> MARIA LIDIANE MARQUES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Área de Estruturas, Unesp, Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira.

**Orientador:** Prof. Dr. Haroldo de Mayo Bernardes

Ilha Solteira

2009

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Marques, Maria Lidiane.  
M357e      Estudo da reação álcali-agregado na tomada d'água da UHE Jaguari por meio de ensaios laboratoriais / Maria Lidiane Marques. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2009.  
156 f. : il., fots. color.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2009

Orientador: Haroldo de Mayo Bernardes  
Bibliografia: p. 136-143

1. Reação álcali-agregado. 2. Materiais de construção - Durabilidade. 3. Concreto - Tecnologia. 4. Estruturas hidráulicas.

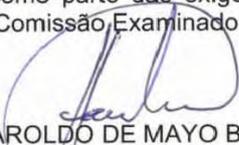
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

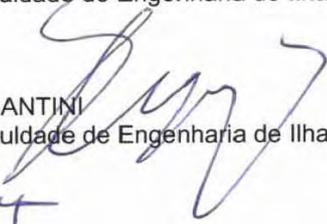
**TÍTULO:** Estudo da reação álcali-agregado na tomada d'água da UHE Jaguari por meio de ensaios laboratoriais

**AUTORA:** MARIA LIDIANE MARQUES

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. HAROLDO DE MAYO BERNARDES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. HAROLDO DE MAYO BERNARDES  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. ANTONIO ANDERSON S SEGANTINI  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. SELMO CHAPIRA KUPERMAN  
Departamento de Engenharia de Construção Civil / Escola Politécnica Da Usp

Data da realização: 06 de fevereiro de 2009.

*À minha querida mãe, Maria Alzenir Marques, aos meus tios: Prof. Dr. Edni Nunes de Oliveira e Raimunda Marques Nunes, e ao querido Everton, que todos esses anos me apoiaram e me incentivaram à estudar, mesmo com todas as dificuldades...*

## AGRADECIMENTOS

*Primeiramente à Deus...*

*À minha mãe Maria Alzenir Marques, à minha tia Raimunda Marques Nunes e ao meu tio Dr. Edni Nunes de Oliveira que sempre me apóiam nos meus projetos, aos meus priminhos lindos e perfeitos, Dani e Gabriel, que são as duas crianças mais inteligentes, fofas e adoráveis que já conheci.*

*Ao meu amor Everton Jose da Silva por sua paciência quase infinita comigo, pela força, carinho, ajuda, apoio... Enfim, por tudo que compartilhamos todos esses anos. Assim como a todos de sua família: Neide, Sr. Jonas, Lanaira e Priscila.*

*À minha madrinha: Maristela Marques Teixeira e a minha querida avó: Maria do Carmo Marques. Mulheres guerreiras!!!*

*Ao meu orientador e amigo, Professor Doutor Haroldo de Mayo Bernardes pela orientação e pela paciência que sempre me dedicou, desde quando nos comunicávamos por email (pois estava em Berkeley na ocasião). Obrigada por me orientar.*

*Ao Engenheiro do Laboratório CESP de Engenharia Civil – LCEC, Flávio Moreira Salles, pelo apoio incondicional, orientação e conselhos dados no andamento deste projeto. Obrigada pela oportunidade de estagiar e depois pelo convite de ingressar em uma nova área no mestrado. Esses três anos de convivência no LCEC me ensinaram muito.*

*Ao Professor Doutor Selmo Chapira Kuperman pela orientação e por compartilhar conosco todo seu conhecimento sobre o assunto.*

*À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pela concessão da bolsa de mestrado, processo: 06/58975-3.*

*À ANEEL pela aprovação do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).*

*Ao grupo de Polímeros do Departamento de Física e Química – DFQ – UNESP pela utilização do equipamento de difração de raios X e espectrômetro de infravermelho.*

*Ao Laboratório CESP de Engenharia Civil, na presença de todos os técnicos da área de Concreto, Solos, Instrumentação e aos Administrativos, que foram sem dúvidas essenciais na realização da pesquisa. Não posso deixar de mencionar cada um de vocês:*

- *Núcleo de Concreto:*

- *Ensaaios físicos: Ademir (Branco), Jorge (Companheiro de “Trabajo”) e Sérgio, que sempre estavam dispostos à ajudar em qualquer atividade, sempre bem humorados e com sorriso no rosto.*

- *Sala química: Bertolucci, Denise e Sumie, pelo grande crescimento técnico e por toda atenção dispensada.*

- *Ensaaios Estruturais: Ao nosso cantor, Anderson e ao Seu Pascoalim.*

– *Sala de Dosagem: Aos grandes homens do CONCRETO, Francisco Eduardo Mendes (Chiquinho), Carlos Roberto (Lana), Marquinho e Michelin. Anteriormente ao Marquinho: Iverson.*

– *Sala de Agregados: Euclides, Joaquim, e Seu Gilmar, por toda atenção e dedicação a mim conferidas. Pelos momentos de descontração, pelos lanchinhos que o Gilmar e o Euclides sempre traziam, pela alegria e simplicidade que desempenhavam sua função.*

- *Às meninas do Administrativo: Ana Paula, Jack, Karen e Karina, pelos ótimos “churras” que fazíamos. Dávamos muitas risadas.... Anteriormente à Karen: Elissandra.*
- *Ao meu companheiro de estágio, Thiago Dias do Espírito Santo, que começou junto comigo no LCEC. Aos estagiários que passaram por aqui durante esses três anos, Renato Frediani Denadai, Rogério Dehira, Flávio Moisés Theodoro da Silva e José Luiz Covolo Júnior.*
- *Aos Engenheiros: Wanderley Ognebene, coordenador do LCEC, Aloísio Céleri, supervisor do Núcleo de Geotecnologia e Claudomiro Maurício da Rocha Filho.*
- *Aos técnicos administrativos: Gilson Alves Taveira e José Joel Marques.*
- *Núcleo de Solos: Ademir dos Anjos, Alaor Gomes Mariano, Antônio Bezerra, Aurélio Celestino, Celso Ramalho, Elpídio Celestino de Souza, Francisco Borges de Souza Porto, Henrique Demerval, João Araújo, Nelson Real, Osmar Valadão, Otávio da Silva Gonçalves, Salvador Neves, Valdemir Boina.*
- *Instrumentação: Célio Fernando Nogueira Del Pintor, Franquilei Leão Pinto, Jair Gomes da Silva, José Lourival Pereira e Vicente de Paula Ferraz de Oliveira.*
- *À Dona Neusa pelos cafés de toda manhã. Ao pessoal dos serviços gerais: Lurdes, Patrícia, Rosângela, Edivaldo, Valdeir e Zilda, sempre alegres e prestativos. Aos motoristas: Antonio Pedro da Silva (Toninho), Francisco de Assis Santana (Chicão) e José Vieira (Zé). Ao José Luiz (Zé) pelo apoio na área de informática do LCEC.*

*Aos meus colegas do Projeto de P&D: Camila Zoilo e Camilo Mizumoto pelo aprendizado compartilhado, pela amizade, pelas descobertas. Posso dizer que aprendi com vocês. À Camila em especial, por toda ajuda e apoio que me dedicou. Graças ao P&D tive a oportunidade de conhece-la melhor e poder assim, construir uma grande amizade.*

*Aos meus AMIGOS queridos que sem dúvida me ajudaram a chegar até aqui e permanecer aqui, por todo esse tempo: Agnes, Aline Botini, Aline Carreno, Ana Paula, Angélica, Camila, Carol, Fernanda, Janaína Matias, Janaína Xavier, Kelly, Mauro, Michely, Pamela, Priscila, Rogério, Stael.e Sueila.*

*À Sueila (Su) em especial pela caminhada que fizemos juntas, desde o Cefet em 1996 até a Unesp em 2007, com muita união e amizade. À essa grande amiga e pessoa.*

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Estrutura química da sílica a) Amorfa b) Cristalina</i> .....	32
<i>Figura 2 – Mecanismo de formação do gel da RAA</i> .....	34
<i>Figura 3 – Características das reações álcali-sílica-silicato</i> .....	35
<i>Figura 4 – Características do agregado antes (a) e depois da reação (b)</i> .....	36
<i>Figura 5 – Desenvolvimento da RAA</i> .....	37
<i>Figura 6 – Mecanismo das expansões e fissuração</i> .....	38
<i>Figura 7 – Expansão devida à RAA em testemunhos extraídos do muro e do piso de uma barragem.</i>	40
<i>Figura 8 – Expansão em testemunhos retirados do bloco DW-3</i> .....	40
<i>Figura 9 – Expansão em testemunhos retirados do bloco DW-1</i> .....	40
<i>Figura 10 – Relação entre expansão de argamassas e tamanho médio dos agregados</i> .....	42
<i>Figura 11 – Expansão de barras de concreto confeccionadas com agregado granítico, armazenadas em ambiente fechado a 38°C e umidade acima de 85%</i> .....	42
<i>Figura 12 – Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O liberados pelo agregado granito com tamanho variando entre 0,15 e 0,08 mm, mantidos em água destilada e solução super saturada de Ca(OH)<sub>2</sub>, à 80°C</i> .....	44
<i>Figura 13 – Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O liberados pelo agregado gnaisse com tamanho variando entre 0,15 e 0,08 mm, mantidos em água destilada e solução super saturada de Ca(OH)<sub>2</sub>, à 80°C</i> .....	44
<i>Figura 14 – Variação da concentração alcalina na película de água do ensaio ASTM C 1293 com o passar do tempo</i> .....	45
<i>Figura 15 – Corpos de prova cobertos com capa de plástico para a inibição da Lixiviação</i> .....	46
<i>Figura 16 – Concentração de álcalis na película de água do ensaio de prismas de concreto proveniente da lixiviação</i> .....	46
<i>Figura 17 – Modelo referente à resistência a compressão e resultados de ensaio</i> .....	48
<i>Figura 18 – Modelo referente ao módulo de elasticidade e resultados de ensaios</i> .....	48
<i>Figura 19 – Resultado dos ensaios mecânicos em função do tempo: (A) Resistência à compressão, (B) Resistência à tração direta, (C) Resistência à tração diametral, (D) Módulo de ruptura.</i> .....	50
<i>Figura 20 – (a) Fissuras no agregado graúdo devido à RAA; (b) Mesma visualização em campo – luz UV depois do tratamento com solução de acetado de uranila. A luz amarela-esverdeada depositada ao redor do agregado é o gel de RAA.</i> .....	55
<i>Figura 21 – Usina Hidrelétrica Jaguari</i> .....	58
<i>Figura 22 – Distribuição geográfica das usinas hidrelétricas da CESP</i> .....	58
<i>Figura 23 – Estrutura da Tomada d'água no período de construção</i> .....	60
<i>Figura 24 – Vista aérea atual da UHE Jaguari</i> .....	60
<i>Figura 25 – (a) Detalhe do MT – 03; (b) Detalhe da fissura na TA e da placa de vidro</i> .....	62
<i>Figura 26 – Esquema da localização e posicionamento dos MT instalados na Laje da TA</i> .....	63
<i>Figura 27 – Medidor triortogonal 1 (MT1) instalado na laje da TA</i> .....	64
<i>Figura 28 – Medidor triortogonal 2 (MT2) instalado na laje da TA</i> .....	64
<i>Figura 29 – Medidor triortogonal 3 (MT3) instalado na laje da TA</i> .....	65
<i>Figura 30 – Organograma de atividades</i> .....	68
<i>Figura 31 – Local de coleta do agregado</i> .....	69

<i>Figura 32 – Agregado comercial procedente da pedreira Sta. Isabel.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 33 – Testemunhos de sondagem da rocha de fundação da TA da UHE Jaguari.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 34 – Fissuras presentes na laje da TA e suas características.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 35 – Ocorrência de fissuras aleatórias na parte externa da TA.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 36 – Vista geral da Tomada d’água – Fotografia de dezembro/2007.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 37 – Procedimento para extração dos testemunhos.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 38 – Identificação das amostras de acordo com o local de extração.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 39 – Corte dos testemunhos em serra de disco.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 40 – Retificação das superfícies dos testemunhos.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 41 – Testemunhos preparados para os ensaios.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 42 – Perfuração dos testemunhos no torno para fixação dos pinos.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 43 – Pinos colados com adesivo epóxi nas duas extremidades dos testemunhos.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 44 – Testemunhos nos suportes do ensaio de reatividade.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 45 – Suporte e base de leituras adaptados para realização do ensaio de reatividade.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 46 – Armazenamento dos CPs nos baldes preparados para o ensaio.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 47 – Leitura das expansões no relógio comparador.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 48 – Ensaio de resistência à compressão.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 49 – Ensaio de módulo de elasticidade.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 50 – CPs preparados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 51 – Ruptura do CP posicionado com sua geratriz em contato com os pratos da prensa.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 52 – Corpos de prova armazenados nos mesmos recipientes do ensaio NBR 15577-6.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 53 – Armazenamento dos CPs em câmara a 40°C.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 54 – Procedimentos para a realização do ensaio de Permeabilidade.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 55 – Confeção das barras de argamassas para ensaio de reatividade.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 56 – Barras imersas em água a 80°C por 24 horas.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 57 – Barras imersas em solução de hidróxido de sódio a 80°C.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 58 – Leituras das barras de argamassas.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 59 – Traço (em massa) necessário para confeccionar seis prismas (7,5 x 7,5 x 28,5 cm) – 12 litros de concreto.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 60 – Etapas da confeção do concreto.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 61 – Confeção dos prismas de concreto.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 62 – (a) Leitura inicial dos CPs; (b) armazenamento nos suportes de cada balde.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 63 – Câmara térmica (40° e 60°C) para acondicionamento dos prismas de concreto.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 64 – Corpo de prova prismático na condição do ensaio de flexão – NBR NM 55/1996.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 65 – Inspeção visual nos testemunhos extraídos.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 66 – Inspeção visual nos testemunhos extraídos.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 67 – Ensaio de expansão residual nos testemunhos extraídos da laje da TA.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 68 – Microscópio estereoscópico de luz refletida utilizado na análise.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 69 – Material coletado de testemunho da UHE Jaguari.....</i>	<i>104</i>

<i>Figura 70 – Aspecto do concreto da UHE Jaguari – Fragmento 1 do testemunho.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 71 – Aspecto do concreto da UHE Jaguari – Fragmento 3 do testemunho.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 72 – Aspecto do concreto da UHE Jaguari – Fragmento 5 do testemunho.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 73 – Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral do concreto reconstituído em laboratório sob duas condições de cura.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 74 – Módulo de elasticidade do concreto reconstituído em laboratório sob duas condições de cura .....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 75 – Resultado de expansão pelo método NBR 15577 – 4 para os agregados graúdos estudados.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 76 – Resultado de expansão pelo método NBR 15577 – 4 para os agregados miúdos estudados .....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 77 – Resultado de expansão pelo método NBR 15577 – 6 submetidos à temperatura de 40°C para os agregados estudados.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 78 – Vista geral dos prismas de concreto com eflorescências na superfície - 6 meses. ....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 79 – Produtos carbonatados aderidos nas paredes do suporte dos prismas.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 80 – Variação do peso dos prismas de concreto expostos ao ensaio NBR 15577 – 6 submetidos à temperatura de 40°C.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 81 – Resultado de expansão pelo método NBR 15577 – 6 submetidos à temperatura de 60°C para os agregados estudados.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 82 – Vista geral dos prismas de concreto com espalhamento de eflorescências na superfície - 6 meses. ....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 83 – Variação dos pesos das barras de concreto expostas ao ensaio NBR 15577 – 6 submetidos à temperatura de 60°C .....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 84 – Ensaio Osipov para os agregados em estudo .....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 85 – Aspecto geral do concreto no qual se observa a argamassa cinza, as dimensões variadas do agregado graúdo, a porosidade normal e boa qualidade da amostra (amostra: ERC – 38) .....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 86 – Aspecto geral do concreto – Amostra: ERC – 38. Observa-se bordas de reação álcali-agregado (RAA) envolvendo o agregado graúdo.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 87 – Aspecto geral do concreto – Amostra: ISA – 60. Observa-se gel da RAA na superfície de descolamento do agregado graúdo e na argamassa.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 88 – Aspecto geral do concreto – Amostra: ERC – 60. Observa-se material branco depositado na superfície de descolamento do agregado graúdo da argamassa .....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 89 – Aspecto do concreto no qual se observa poro (P) com depósito de material submicroscópico (amostra: ERC – 60). Microscópio de luz transmitida. Nicóis paralelos. Ampliação 40x.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 90 – Aspecto do concreto no qual se observa poro (P) preenchido por etringita. (Amostra: ISA – 60). Microscópio de luz transmitida. Nicóis paralelos. Ampliação 40x. ....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 91 – Fotomicrografia do agregado graúdo (AG) no qual se observa minerais triturados (T) e orientação dos minerais (M). Microscópio de luz transmitida. Amostra: ERC – 60. Nicóis cruzados. Ampliação 10x.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 92 – Difratograma de raios-X de testemunho extraído em 2007 da Laje da TA .....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 93 – Difratograma de raios-X de testemunho extraído da laje da TA no ano 2000.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 94 – Difratograma de raios-X do agregado 1 coletado do enrocamento.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 95 – Difratograma de raios-X do agregado 2 coletado do enrocamento .....</i>	<i>148</i>

<i>Figura 96 – Difratoograma de raios-X do agregado coletado da pedreira comercial Sta. Isabel .....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 97 – Difratoograma de raios-X de testemunhos de sondagem extraídos da rocha de fundação da TA.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 98 – Espectro de transmitância de infravermelho em testemunhos de concreto extraídos da Laje da TA no ano 2000 e no ano de 2007.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 99 – Espectro de transmitância de infravermelho em agregados coletados do enrocamento da barragem, agregado de pedreira comercial e testemunhos de sondagem da rocha de fundação. ....</i>	<i>150</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Correlação entre as taxas de expansão e os danos causados às estruturas.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 2 – Resultados das propriedades mecânicas obtidos por Silva (2007).....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 3 – Ficha técnica da UHE Jaguari .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 4 – Resumo das análises químicas dos cimentos utilizados nas barragens brasileiras.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 5 – Análise físico-química do cimento empregado na reconstituição do traço de concreto.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 6 – Resultado da análise química dos testemunhos .....</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 7 – Resultados da análise química do cimento empregado .....</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 8 – Traço em massa obtido pelo testemunho .....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 9 – Resultado da análise química dos corpos-de-prova de concreto.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 10 – Traço em massa para o concreto confeccionado.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 11 – Traço de concreto empregado para a confecção dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios mecânicos.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 12 – Análise química do concreto pobre e rico .....</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 13 – Traço em massa para o concreto rico e pobre.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 14 – Traço de concreto com consumo de cimento de 420 kg/m<sup>3</sup> (Traço rico).....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 15 – Traço de concreto com consumo de cimento de 220 kg/m<sup>3</sup> (Traço pobre).....</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 16 – Características físico-químicas do cimento utilizado .....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 17 – Características físico-químicas do cimento padrão utilizado.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 18 – Frações granulométricas do agregado graúdo .....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 19 – Resultados dos coeficientes de permeabilidade dos corpos-de-prova moldados (m/s)..</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 20 – Resultados do ensaio de tração na flexão dos prismas de concreto .....</i>	<i>119</i>
<i>Tabela 21 – Resumo da classificação reativa dos agregados de acordo com cada ensaio realizado</i>	<i>131</i>
<i>Tabela 22 – Análises químicas de testemunhos extraídos e dos agregados .....</i>	<i>145</i>

## LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 1 – Casos de reação álcali-agregado ocorridos em barragens no panorama mundial .....</i>	<i>23</i>
<i>Quadro 2 – Ocorrência de reação álcali-agregado em barragens no Brasil.....</i>	<i>28</i>
<i>Quadro 3 – Componente em cada eixo de referência dos medidores triortogonais.....</i>	<i>63</i>
<i>Quadro 4 – Análise macroscópica do concreto .....</i>	<i>122</i>
<i>Quadro 5 – Análise macroscópica do concreto .....</i>	<i>122</i>
<i>Quadro 6 – Características gerais dos agregados graúdos .....</i>	<i>127</i>
<i>Quadro 7 – Características gerais dos agregados graúdos .....</i>	<i>127</i>
<i>Quadro 8 – Síntese das características petrográficas dos agregados graúdos.....</i>	<i>128</i>
<i>Quadro 9 – Síntese das características dos agregados miúdos.....</i>	<i>128</i>
<i>Quadro 10 – Síntese das características petrográficas dos agregados graúdos.....</i>	<i>129</i>
<i>Quadro 11 – Síntese das características dos agregados miúdos.....</i>	<i>129</i>
<i>Quadro 12 – Síntese das características gerais da areia .....</i>	<i>131</i>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

*ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland*

*ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas*

*ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica*

*ASTM - American Society for Testing and Materials*

*CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens*

*CESP - Companhia Energética de São Paulo*

*CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco*

*CP – Corpo de prova moldado*

*IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto*

*ICOLD – International Committee on Large Dams*

*IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo*

*LCEC – Laboratório CESP de Engenharia Civil*

*NBR – Norma Brasileira*

*P&D – Pesquisa e Desenvolvimento*

*RAA - Reação álcali-agregado*

*RAS - Reação álcali-sílica*

*RASS – Reação álcali-sílica-silicato*

*SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo S.A.*

*TA – Tomada d'água*

*UHE – Usina Hidrelétrica*

*UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”*

## RESUMO

MARQUES, M. L. **Estudo da reação álcali-agregado na Tomada d'água da UHE Jaguari por meio de ensaios laboratoriais.** 2009. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

Diante dos vários casos registrados de anomalias surgidas em concretos de diferentes estruturas devidas às reações deletérias do tipo álcali-agregado (RAA), pesquisadores de todo o mundo têm buscado conhecer melhor o problema, entender seu mecanismo e caracterizar estruturas já afetadas. Realizou-se no presente trabalho um estudo de caso sobre a Tomada d'água (TA) da UHE Jaguari, visando estimar a expansibilidade do concreto dessa estrutura e a reatividade de agregados provenientes da região. Para isto, foram analisados testemunhos extraídos da TA por meio de ensaios de expansão, análises químicas e microestruturais, e um concreto com traço reconstituído em laboratório, reproduzindo o traço utilizado na construção da TA, avaliando a resistência mecânica, a propriedade elástica e a permeabilidade. Realizou-se um estudo em separado dos agregados coletados da região (enrocamento da barragem, pedreira comercial e testemunho de sondagem da rocha de fundação da TA) por se tratar de materiais que provavelmente têm a mesma procedência que o empregado na barragem. Foram realizadas análises químicas, usando técnicas como difração de raios X e infravermelho, bem como análises do potencial expansivo, por meio de barras de argamassa e prismas de concreto, conforme as normas NBR 15577-4 e NBR 15577-6, respectivamente. Este conjunto de informações constitui uma contribuição para que venha a ser feita uma avaliação da real situação da estrutura no tocante à RAA, estabelecendo parâmetros iniciais para estimar em qual estágio de expansão a estrutura se encontra.

**Palavras-Chave:** Concreto, Reação Álcali-Silicato, Ensaios Laboratoriais, Expansões Residuais, Barragem.

## ABSTRACT

MARQUES, M. L. **Study on the alkali-aggregate reaction in the Jaguari Hydra power plant intake structure using laboratory tests.** 2009. 156f. Dissertation (Civil Engineering Master's Degree) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

Ahead of some registered cases of anomalies appeared in concrete of different structures due to the deleterious reactions of the alkali-aggregate reaction (AAR) type, researchers of all over the world have studied this problem, to understand its mechanism and to characterize structures which were already affected. In the present work, a characterization of the concrete used in this dam and a study of residual expansion obtained from extracted cores was performed. The case study was the intake of Jaguari Hydra Power plant, because it presents cracks that are characteristic of alkali-aggregate reaction. Tests were made on the same core of Jaguari Hydra Power Plant and in concrete from laboratory, using a local aggregate in order to evaluate: the strength, the elastic property, the permeability and the expansibility; as well as, chemical and micro structural analysis. Another study was made with aggregate collected from the rockfill of the dam, because this aggregate probably has the same origin that the one which were used in the dam construction and collected from soundings of the foundation rock of intake structure of Jaguari Power plant. This study contemplated chemical analysis, using techniques such as X-ray diffraction and infra-red ray, as well as analysis of the expansive potential in mortar bars and concrete prisms, through method NBR 15577-4 e NBR 15577-6, respectively. All this information will be useful to establish initial parameters and estimate what is the stage of the structure expansion due to alkali-aggregate reaction.

**Keywords:** Concrete, Alkali-Silicate Reaction, Experimental Methods, Residual Expansion, Dam.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1.	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA	17
1.2.	OBJETIVOS DA PESQUISA	18
1.3.	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA	18
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
2.1.	HISTÓRICO	20
2.2.	A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)	31
<b>2.2.1.</b>	<b>Mecanismos das reações álcali-sílica e álcali-sílica-silicato</b>	<b>31</b>
<b>2.2.2.</b>	<b>Reação álcali-sílica-silicato</b>	<b>35</b>
2.3.	EFEITOS DA RAA SOBRE O CONCRETO	37
<b>2.3.1.</b>	<b>Deformações causadas pela RAA</b>	<b>37</b>
<b>2.3.2.</b>	<b>Expansões residuais</b>	<b>38</b>
<b>2.3.3.</b>	<b>Influência do agregado</b>	<b>41</b>
<b>2.3.4.</b>	<b>Lixiviação dos corpos de prova</b>	<b>45</b>
<b>2.3.5.</b>	<b>Alterações das propriedades mecânicas do concreto</b>	<b>47</b>
2.4.	MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO DA RAA	51
<b>2.4.1.</b>	<b>Experimental</b>	<b>51</b>
2.4.1.1.	Laboratório	51
2.4.1.1.1.	Macroscópico	51
2.4.1.1.2.	Microscópico	53
2.4.1.2.	Campo	54
2.4.1.2.1.	Inspeções visuais	54
2.4.1.2.2.	Contraste químico	54
2.4.1.2.3.	Instrumentação	55
<b>2.4.2.</b>	<b>Analítico</b>	<b>57</b>
2.4.2.1.	Modelos matemáticos	57
<b>3.</b>	<b>A USINA HIDRELÉTRICA DE JAGUARI – SP</b>	<b>58</b>
3.1.	OBSERVAÇÕES DA INSTRUMENTAÇÃO NA LAJE DA TA	62
<b>4.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>67</b>
4.1.	MATERIAIS EMPREGADOS	69
4.2.	METODOLOGIA APLICADA AOS TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS	71
<b>4.2.1.</b>	<b>Inspeção da Barragem “in loco” e Extração dos Testemunhos</b>	<b>71</b>
<b>4.2.2.</b>	<b>Preparação dos testemunhos</b>	<b>74</b>
<b>4.2.3.</b>	<b>Inspeção visual dos testemunhos extraídos</b>	<b>75</b>
<b>4.2.4.</b>	<b>Ensaio de expansão residual nos testemunhos</b>	<b>75</b>
<b>4.2.5.</b>	<b>Análise Petrográfica e mineralógica</b>	<b>77</b>

4.3.	METODOLOGIA APLICADA AO CONCRETO RECONSTITUÍDO	78
4.3.1.	<b>Materiais</b>	78
4.3.2.	<b>Método IPT de reconstituição de traço de argamassas – adaptado para concreto</b>	81
4.3.3.	<b>Ensaio mecânicos no concreto reconstituído</b>	88
4.4.	METODOLOGIA APLICADA AOS AGREGADOS	91
4.4.1.	<b>Ensaio de expansão pelo método acelerado ABNT – NBR 15577 – 4/2008.</b>	91
4.4.2.	<b>Ensaio em prisma de concreto – ABNT – NBR 15577 – 6/2008</b>	93
4.4.3.	<b>Ensaio de tração na flexão dos prismas de concreto do ensaio NBR 15577-6</b>	98
4.4.4.	<b>Ensaio Osipov</b>	98
4.4.5.	<b>Análise Petrográfica e mineralógica</b>	99
5.	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS</b>	<b>100</b>
5.1.	INVESTIGAÇÃO DOS TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS	100
5.1.1.	<b>Inspeção visual nos testemunhos extraídos</b>	100
5.1.2.	<b>Ensaio de expansão residual nos testemunhos extraídos</b>	102
5.1.3.	<b>Análise petrográfica</b>	103
5.2.	INVESTIGAÇÃO DO CONCRETO RECONSTITUÍDO	106
5.2.1.	<b>Propriedades mecânicas</b>	106
5.2.2.	<b>Ensaio de permeabilidade</b>	108
5.3.	INVESTIGAÇÃO DO AGREGADO	109
5.3.1.	<b>Ensaio de expansão pelo método acelerado ABNT – NBR 15577 – 4/2008</b>	109
5.3.2.	<b>Ensaio em prismas de concreto ABNT – NBR 15577-6/2008</b>	112
5.3.3.	<b>Ensaio de flexão nos prismas de concreto do ensaio acelerado (NBR 15577-6)</b>	118
5.3.4.	<b>Ensaio Osipov</b>	120
5.3.5.	<b>Análise Petrográfica</b>	121
5.3.6.	<b>Classificação dos agregados estudados</b>	131
6.	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>132</b>
7.	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>137</b>
	<b>APÊNDICE A – Caracterização dos Materiais – Resultados</b>	<b>145</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

A CESP sempre se mostrou atenta na fase construtiva de seus empreendimentos com a Reação álcali-agregado (RAA), tomando os devidos cuidados para inibir a ocorrência do processo reativo durante a vida útil das usinas.

Após investigações realizadas em 2000, concluiu-se que o concreto da Tomada d'água (TA) da UHE Jaguari apresentava a RAA, com um quadro de fissuração característico. Para esse empreendimento não foram tomadas medidas para inibição da reação, pois, acredita-se que os métodos de ensaios utilizados na época da construção indicaram não haver necessidade.

Diante do problema apresentado na UHE Jaguari, a CESP está desenvolvendo um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em parceria com a ANEEL, UNESP, ABCP e Desek, cujos objetivos são:

- Desenvolver metodologia e equipamentos de ensaios acelerados para a determinação da RAA em concretos.
- Desenvolver e adaptar metodologias para a detecção da RAA através do teste colorimétrico (Método da Mancha), utilizando-se produtos disponíveis no Brasil.
- Determinar as taxas de expansão do concreto da Tomada D'Água da UHE Jaguari, por meio de instrumentação instalada e associá-las a ensaios laboratoriais.
- Identificar as porcentagens mínimas de produtos inibidores da RAA a serem adicionadas aos concretos, a partir da metodologia desenvolvida, e comparar às diferentes metodologias consagradas em épocas anteriores.

Tendo como referência a Usina de Jaguari, na hipótese de a reação álcali-agregado se intensificar e não vir a ser detectada (um dos principais objetivos do projeto de P&D), danos ainda maiores poderão ser causados nas suas estruturas e o processo de geração da usina poderá ser afetado.

Outra consequência que a eventual intensificação da RAA poderá provocar será a de restringir ou mesmo impedir a descarga d'água mínima à jusante, comprometendo o abastecimento de água para o Vale do Paraíba e do Estado do Rio de Janeiro (há uma descarga mínima obrigatória), de natureza imensurável e extremamente grave.

A reação álcali-agregado tem como característica principal a formação de um gel que provoca expansão, causada por absorção de umidade. Esta expansão pode afetar seriamente o concreto, causando eventuais desnivelamentos, deformações e deslocamentos diferenciais,

que poderão prejudicar o funcionamento das instalações mecânicas e provocar problemas operacionais.

Atualmente, são observadas na laje da TA, fissuras com aberturas da ordem de milímetros, contornando os pilares do pórtico. Acredita-se que essas aberturas tenham sido causadas indiretamente pela RAA. A TA é estruturada com contrafortes inclinados que estão afetados pela reação. Logo, as reações atuantes nessa estrutura, devidas a essa patologia, causam expansões que são transmitidas ao topo (Laje da TA), ocorrendo deslocamentos e conseqüentemente, as trincas observadas. Esses deslocamentos são medidos por meio de três Medidores Triortogonais (MT) instalados na Laje da TA.

O monitoramento da Tomada d'água da UHE Jaguari possibilitará a adoção de medidas corretivas, caso as expansões verificadas sejam significativas, indicando movimentações indesejáveis nas interfaces entre estruturas civis e equipamentos eletromecânicos.

## 1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho tem como objetivo geral estudar a expansibilidade do concreto da Tomada d'água (TA) no tocante à RAA e de agregados provenientes da região da barragem, analisando suas características químicas e reativas, bem como, tentar reproduzir em laboratório um traço de concreto semelhante ao que foi usado na construção da TA. Com este conjunto de informações, pretende-se contribuir para uma avaliação da real situação da estrutura.

## 1.3. ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

A dissertação foi desenvolvida em sete capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se uma introdução abordando a importância e a relevância da pesquisa, os objetivos e a organização da pesquisa.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica, contemplando: o histórico das barragens afetadas pela RAA no panorama mundial e nacional; estudos sobre o tema reação álcali-agregado, contendo: os tipos de reação álcali-agregado, os mecanismos da reação álcali-sílica, a reação álcali-silicato, que é o estudo de caso em questão; o efeito da RAA sobre o concreto; e os métodos de investigação da RAA.

O terceiro capítulo apresenta um resumo sobre a Usina Hidrelétrica de Jaguari, contemplando suas características e detalhes da instrumentação instalada na laje da TA.

O quarto capítulo apresenta o programa experimental com descrição da metodologia desenvolvida: inspeção “in loco” da barragem; extração; preparação e inspeção visual dos testemunhos; ensaios laboratoriais com os testemunhos e com o concreto reconstituído em laboratório; e os ensaios realizados nos agregados estudados.

No quinto capítulo são apresentados os resultados da investigação realizada nos testemunhos extraídos, o procedimento para a reconstituição do traço de concreto da TA, bem como sua caracterização em laboratório e as investigações realizadas nos agregados em estudo.

O capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas no trabalho, bem como as limitações encontradas na pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

O capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas e na seqüência o apêndice.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. HISTÓRICO

As reações químicas prejudiciais tal como a Reação álcali-agregado (RAA), classificada como reação álcali-sílica, álcali-silicato ou álcali-carbonato, foram encontradas em um grande número de barragens em todo o mundo.

Charlwood e Solymar (1994) relataram 104 casos mundialmente conhecidos de RAA em estruturas hidráulicas, dos quais 32 são de barragens de concreto em arco. A maioria das barragens em arco afetadas pelo problema foi construída antes da descoberta da RAA na Califórnia, por Stanton em 1940, ou logo em seguida quando os indícios nos processos de expansão ainda estavam emergindo. Entretanto, alguns casos de RAA relatados na África do Sul e Moçambique ocorreram em 1960 e outros mais recentes, em 1974.

Um grande número de barragens em arco sujeitas a RAA continuaram a funcionar adequadamente por muitos anos. Nos casos das barragens *Gene Wash*, *Copper Basin* e *Parker Dam*, as tensões substanciais ocorreram nos primeiros 20 anos após a construção. Nos casos das barragens *Stewart Mountain*, *Churchil* e *Gmued Dam*, medidas de reforço das estruturas foram requeridas. Na barragem de *Matilija*, os 12 metros superiores da estrutura foram substituídos devido à deterioração severa do concreto. Na barragem *Drum Afterbay*, a reação progredia a uma taxa tão elevada que a barragem ficou fora de operação e teve de ser substituída por uma nova estrutura, também construída em arco, imediatamente a jusante (CHAPTER 11 – ARCH DAMS, 1999, p.11)

Segundo Silveira (1997) as taxas de expansão das barragens brasileiras conjuntamente com outras do exterior, afetadas pela RAA, estão apresentando taxas de expansão média da ordem de  $60 \times 10^{-6}$  m/ano, para as barragens tipo gravidade, e da ordem de  $15 \times 10^{-6}$  m/ano, para as barragens tipo arco. Em termos dos danos causados pela expansão do concreto em barragens e usinas hidrelétricas, em função da severidade, observa-se de acordo com a Tabela 1 o seguinte:

Tabela 1 – Correlação entre as taxas de expansão e os danos causados às estruturas

Fonte: SILVEIRA, (1997)

Taxa de Expansão ( $\times 10^{-6}$ m/ano)	Intensidade dos danos observados
< 20	Pouco expressivos
20 a 50	Média intensidade
>50	Danos severos

A barragem de *Fontana*, construída durante a 2ª Guerra Mundial, no Rio Little Tennessee, possui 146 metros de altura. Até 1972 não apresentou problemas, quando foi verificada uma fissura considerável, cerca de 1 centímetro, próxima à face jusante de uma das galerias. Atualmente, as expansões na barragem permanecem constantes em aproximadamente  $19 \times 10^{-3}$  m/ano. Foram instalados pêndulos diretos em diversos poços da barragem para a observação das deflexões a montante e medidores de tensão (SAOUMA; YUNPING XI, 2004, p.56).

Chambon é provavelmente o exemplo mais notório de reação álcali-agregado na França. É uma barragem de gravidade de 88 m de altura, construída no começo dos anos 1930. Deslocamentos irreversíveis apareceram aproximadamente 25 anos depois da sua construção a uma taxa de aproximadamente  $5 \times 10^{-3}$  m/ano, assim como movimentos ascendentes da crista de até  $3,6 \times 10^{-3}$  m/ano. Estima-se que a expansão provocada pela RAA varia de 10 a  $80 \times 10^{-6}$  m/ano (SAOUMA; PEROTTI, 2005, p.2).

Em Portugal, a barragem de gravidade de Pracana possui 60 m de altura e foi construída entre 1948 e 1951. Após 23 anos, observaram-se deslocamentos à jusante da barragem da ordem de  $1,2 \times 10^{-3}$  m/ano (SAOUMA; PEROTTI, 2005, p.3).

A barragem de *Belesar*, tipo arco, tem 130 m de altura e 600 m de comprimento. Sua construção foi concluída em 1963. As análises dos descolamentos por meio de pêndulos, apresentaram movimentos com taxas de expansões variando entre 5 e  $25 \times 10^{-6}$  m/ano (HOYO; GUTIERREZ, 1994, p.506).

Na barragem de Mactaquac, Canadá, a evidência de anomalias nas estruturas de concreto foi observada primeiramente por volta dos anos 1970 pela abertura crescente de uma junta de contração vertical na subestrutura da Casa de Força (GILKS; CURTIS, 2003 apud SAOUMA; YUNPING XI, 2004, p.56). A taxa de expansão em Mactaquac, de acordo com os dados da instrumentação é de  $150 \times 10^{-6}$  m/ano. A expansão real dentro das estruturas é geralmente menor, devido a natureza da reação e pode variar de 0 a  $145 \times 10^{-6}$  m/ano, embora, em algumas posições isoladas, taxas tão elevadas quanto  $200 \times 10^{-6}$  m/ano foram medidas (HUGHES; CURTIS, 2001).

O primeiro registro de ocorrência de expansão de origem química em uma barragem brasileira ocorreu com a de Peti, construída em 1946, em Minas Gerais. Posteriormente, o problema foi detectado também em Moxotó, Pernambuco (BERNARDES, 2000, p.8).

Na Usina de Moxotó localizada no Rio São Francisco e pertencente ao complexo de Paulo Afonso, constataram-se várias evidências de RAA durante o período construtivo (1972-1977). Em 1984 passou a ser a primeira barragem brasileira monitorada com a finalidade de se constatar a ocorrência de reação deletéria. Para o acompanhamento das expansões do concreto com o tempo, assim como para a avaliação das medidas corretivas, instalaram-se extensômetros múltiplos, pêndulos verticais, deformímetros corretores e marcos de deslocamentos superficiais (PAPPALARDO JUNIOR, 1998, p.19). Segundo Silveira (1997) as taxas de expansão observadas na barragem são de  $90 \times 10^{-6}$  m/ano.

A barragem de *Billings-Pedras* foi concluída em 1936, e em 1992 foram constatados sintomas típicos de RAA. Instaurou-se neste mesmo ano um programa de investigação minucioso envolvendo a extração de testemunhos de concreto, exames petrográficos e determinação das resistências à tração e compressão do concreto. A partir de 1995 foi instalado um sistema de auscultação na estrutura composto por extensômetros múltiplos, bases de convergência, medidores triortogonais de junta e marcos de deslocamento superficial ao longo da crista da barragem (PAPPALARDO JUNIOR, 1998, p.13). Segundo Guerra et al. (1997) as taxas verticais de expansão do concreto apresentam variações entre 10 e  $30 \times 10^{-6}$  m/ano.

As primeiras observações de reação álcali-agregado na UHE Furnas ocorreram em 1976, após 13 anos do término da construção. Apesar das manifestações da RAA, as taxas de expansão observadas anualmente representam uma das mais baixas quando comparada com outras barragens mais afetadas como Moxotó, por exemplo, onde as taxas são cerca de sete vezes superiores. Segundo Silveira (2003), a porosidade dos concretos da usina de Furnas pode ter sido benéfica aliada ao baixo teor de álcalis (álcalis totais igual a 0,23%), fato que pode ter contribuído para as baixas expansões devidas à reação – apresentando  $0,22 \times 10^{-3}$  m/ano. Em 2008 foi publicado um artigo no *Hydro Review Worldwide* relatando problemas de desalinhamento de máquinas na usina.

Os Quadros 1 e 2 apresentam casos de barragens afetadas por essa patologia conhecidos mundialmente e nacionalmente, respectivamente.

Quadro 1 – Casos de reação álcali-agregado ocorridos em barragens no panorama mundial

Fonte: Adaptado do site: [www.ibracon.org.br/Concreto/RAA.html](http://www.ibracon.org.br/Concreto/RAA.html) (1998).

Barragem	País	Fim da construção/Evidências da RAA	Ocorrências notadas	Tipo de reparo ou recuperação
Alto Ceira	Portugal	1949/xxxx	Movimentação, fissuração	-
American Falls	EUA	1925/1940	Fissuração, desintegração	Substituída em 1977
Andrews	Canadá	1937/1993	-	-
Asejro	Nigéria	1966/1962	Fissuração, emperramento das comportas	Concreto de capa, injeção de cimento e epóxi
Bartlett	EUA	1936/xxxx	Perda de resistência	Teste com hidróxido de lítio
Beauharmois I	Canadá	1935/xxxx	Expansão, deformação, fissuração, ovalização na Casa de Força.	Injeção em 1947, reparos em 1950, ancoragem e injeções em 1970, corte de juntas novo corte em 1984.
Beauharmois II	Canadá	1951/xxxx	Expansão, deformação, fissuração, ovalização na Casa de Força	Injeção, reparos, ancoragem e injeções, corte de juntas.
Beauharmois III	Canadá	1961/xxxx	Expansão, deformação, fissuração, ovalização na Casa de Força	Injeção, reparos, ancoragem e injeções, corte de juntas.
Bimont	França	1952/xxxx	Expansão, fissuração	Injeção, capa de epóxi nas partes afetadas
Bióytjern	Noruega	1952/1970	Fissuração, redução da folga das comportas	Selagem com epóxi, corte de juntas de expansão, injeção
Buck	EUA	1912/1922	Expansão, fissuração	Reparo após 30 anos
Buyo	Costa do Marfim	1970/xxxx	-	Reparos superficiais
Canades	EUA	1927/1990	Fissuração, expansão	Reparos superficiais
Cabora Bassa	Moçambique	1974/xxxx	Expansão sem fissuração	Em estudo
Cabril	Portugal	-	Fissuração	-
Carillo	Canadá	-	Fissuração	-
Castelnau	França	1950/1977	Expansão	-
Center Hill	EUA	1948/1967	Vazamento nas juntas, emperramento de comportas	Ancoragem das juntas de construção, corte das juntas de expansão

Barragem	País	Fim da construção/Evidências da RAA	Ocorrências notadas	Tipo de reparo ou recuperação
Chambon	França	1935/1952	Deformações, fissuração das ombreiras, aberturas de juntas horizontais	Construção de novo vertedouro, injeções, corte de juntas, impermeabilização a montante de PVC em 1995
Chelsea	Canadá	1927/xxxx	-	Ancoragem, corte de juntas
Chickamagua	EUA	1940/1964	Fissuração	Ajustes das guias das comportas
Chickamauga Lock	EUA	1940/1954	Fissuração, expansão	Protensão, corte de junta (1965, 1970) e injeção
Churchill	África do Sul	1943/1957	Fissuração	Reforço com ampliação dos contrafortes com concreto armado
Clanwilliam	África do Sul	1950/xxxx	Fissuração	-
Coolidge	EUA	1929/xxxx	Deterioração onde foi usado cimento com alto teor de álcalis	Concreto, comportas do vertedouro
Conniston	Canadá	1935/1966	Infiltração, fissuração, deformação dos stop, efeitos de gelo-degelo	Reposição superficial do concreto
Copper Basin	EUA	1938/1945	Fissuração	Barragem substituída em 1965
Coteau 1, 2, 3	Canadá	-	-	-
Dale	Noruega	1952/1970	Fissuração, diminuição das folgas das comportas	Selagem com epóxi, corte de juntas de expansão, injeção
Dinas	País de Gales	1957/1967	Fissuração	-
Dragan-Lad	Romênia	1980/1982	Fissuração	-
Drum Afterbay	EUA	1924/1965	Fissuração, expansão	Barragem substituída nos anos 60
Fontana	EUA	1946/1972	Expansão, fissuração	Protensão, injeção, corte de juntas em 1976 e 1983
Friant	EUA	1942/xxxx	Fissuração, deslocamentos próximos das comportas	Protensão, injeção
Gastshore	Canadá	1958/1993	Movimentação diferencial entre monólitos	-
Gene Wash	EUA	1937/xxxx	Redução de resistência do concreto	Reação considerada terminada
Gibraltar	EUA	1920/xxxx	Fissuração	Reforço com adição de concreto (CCR)
Gmued	EUA	1920/xxxx	Fissuração	Reforço com adição de seção gravidade

<b>Barragem</b>	<b>País</b>	<b>Fim da construção/Evidências da RAA</b>	<b>Ocorrências notadas</b>	<b>Tipo de reparo ou recuperação</b>
Gouin	Canadá	-	-	-
Grand-Mère	Canadá	-	-	-
Green Mountain	EUA	1943/xxxx	Fissuração	-
Gydynys	País de Gales	1926/1967	Fissuração	-
Hendermur	País de Gales	1926/1967	Fissuração	-
High Falls	Canadá	1933/1993	Fissuração intensa, deterioração superficial	Pequenos reparos no concreto e substituição de um pilar
Hirakud	Índia	1956/xxxx	Lascamento do concreto, emperramento de comportas, fissuração	Injeção química, instalação de ancoragens
Hollingsworth	Canadá	1959/1933	Algumas fissuras de grande abertura, fissuras nas vigas dos pórticos rolantes, fissuração de paredes de tijolos	-
Horse Mesa	EUA	1927/1946	Deterioração superficial, separação de juntas	Reparos superficiais
Hound Chute	Canadá	1920/xxxx	Alguma infiltração	Selagem
Hull-2	Canadá	-	-	-
Hunderfossen	Noruega	1963/1967	Fissuração superficial	-
Ilsee	Suíça	1943/1967	Expansão, movimentação	Injeção, impermeabilização com membrana de PVC na face de montante
Kamburu	Quênia	1974/1962	Deslocamentos de pilares, fissuração, bolhas	Injeção e ancoragem
Keerom	África do Sul	1954/1966	Fissuração	Injeção
Kleinplass	África do Sul	1960/xxxx	Fissuração em galerias	Selagem de juntas
Kpong	Gana	1961/1992	Fissuras da Casa de Força, ovalização das unidades	-
La Gabelle	Canadá	-	-	-
La Tuque	Canadá	1940/xxxx	Fissuração, redução de folgas das comportas	Corte de juntas em 1993, selagem
Lac Mitis	Canadá	-	-	-
Les Cedres	Canadá	-	-	-
Lady Evelyn Lake	Canadá	1925/1969	Fissuração	Deterioração, substituição em 1972
Mckay	Canadá	1936/1957	Fissuração subvertical, deterioração superficial	-

Barragem	País	Fim da construção/Evidências da RAA	Ocorrências notadas	Tipo de reparo ou recuperação
Mactaquac	Canadá	1968/1978	Emperramento de comportas do vertedouro, fissuração, abertura de juntas, ovalização	Corte de juntas na Casa de Força
Malay Falls	Canadá	-	-	-
Martin	EUA	-	-	-
Matabitchuan	Canadá	1909/xxxx	Expansão, fissuração	Reabilitada em 1953
Matilija	EUA	1947/1961	Expansão, deterioração	Corte de junta em 1965, substituição da parte superior (12 metros)
Maury	França	1947/xxxx	Fissuração	-
Maentwong	País de Gales	1926/1966	Deterioração devido à lixiviação	Substituída em 1990
Mcphail	Canadá	1954/1993	Fissuração, lascamento, cisalhamento da viga do pórtico rolante	-
Mormon	EUA	1920/xxxx	-	-
Owen Falls	Uganda	1954/1969	Fissuração no piso do gerador e concreto do tubo de sucção	Protensão antes da identificação do problema de RAA
Owyhee	EUA	1932/1937	Fissuração após 5 anos e deterioração após 11 anos	-
Parker	EUA	1938/1939	Fissuração	Expansão suposta cessada em 1965
Pathfinder	EUA	1909/xxxx	Deterioração de parapeitos e paredes da Casa de Força	Reparos superficiais
Paugan	Canadá	1928/xxxx	Fissuração nos encontros	Corte de juntas (1992)
Paul Sauer (Kougha)	África do Sul	1969/1978	Fissuração nas juntas de construção, movimentação	-
Petty Harbor	Canadá	1923/xxxx	-	-
Piedra Del Aquila	Argentina	1966/xxxx	-	-
Pietersfontein	África do Sul	1966/1965	Redução da resistência à tração	-
Poortjenskllof	África do Sul	1955/1965	Fissuração horizontal	Pequenos reparos
Portodemouros	Espanha	1967	Fissuração, deslocamentos	Injeção de cimento, injeção de resina
Pracana	Portugal	1951/1977	Fissuração, infiltração, deslocamentos	Impermeabilização a montante, com membrana de PVC, injeções de cimento e epóxi
R. H. Saunders	Canadá	1947/xxxx	Movimentação, problemas de operação da turbina e gerador	Primeiros cortes de juntas em 1993, a seguir em 1994 e 1995
Rapid Des Isles	Canadá	1975/1963	Fissuração no concerto das unidades	-

Barragem	País	Fim da construção/Evidências da RAA	Ocorrências notadas	Tipo de reparo ou recuperação
Rapides Des Quinze	Canadá	-	-	-
Rapides Farmers	Canadá	1929/xxxx	-	-
Rihand	Índia	1962/1972	Fissuração	Injeção de epóxi, reparos nas comportas do vertedouro e guindastes
Rivières des Prairies	Canadá	-	-	-
Roode Elsburg	África do Sul	1968/1966	-	-
Shawinigan 2	Canadá	-	-	-
Saheim	Noruega	1952/1972	Fissuração, movimentação da turbina	-
Sales	Espanha	1973/1975	Fissuração e escorregamento de blocos	Injeção de resina epóxi, impermeabilização
San Esteban	Espanha	1955/xxxx	Deformação para montante, injeção de juntas	-
Santa Luzia	Portugal	1943/xxxx	Fissuração	Selagem da face montante
Santeetlah	EUA	1926/1942	Fissuração, reação ainda aparente em 1996	Primeiro corte de juntas em 1942, injeção de epóxi, concreto adicional
Sartigan	Canadá	1967/1965	Expansão, deformação de pilar do vertedouro	-
Sept Chutes	Canadá	-	-	-
ST – Narcisse	Canadá	-	-	-
Scott Falls	Canadá	1953/1993	Combinação de gelo-degelo e RAA causando danos superficiais, guias da grade desalinhada	-
Shasta	EUA	1948/xxxx	Fissuração	-
Skarfoss	Noruega	1953/xxxx	Fissuração superficial, danos por gelo-degelo	-
Soda	EUA	1925/xxxx	Fissuração, vazamento danos à face jusante	-
Steenbras	África do Sul	1964/xxxx	Movimentações	Em estudo
Stewart Mountain	EUA	1930/1935-1943	Expansão, movimentação, deterioração	Injeção, modificações estruturais
Stolsvatn	Noruega	1970/1988	Fissuração superficial, danos por gelo-degelo	Capa de epóxi e ancoragens
Stompdrift	África do Sul	1965/1967	Fissuração, abertura de juntas	Injeção das juntas da contração

Barragem	País	Fim da construção/Evidências da RAA	Ocorrências notadas	Tipo de reparo ou recuperação
Tarbela	Paquistão	1976/1979	Fissuração	-
Temiscouata	Canadá	1933/1960	Fissuração	Juntas preenchidas com asfalto, pilares reconstruídos em 1993-94
Temple	França	1951/xxxx	Fissuração	Injeção química, ancoragens
Tisiel	Noruega	1952/1970	Fissuração superficial, gelo-degelo, redução de folga das comportas	Selagem com epóxi, corte de juntas de expansão, injeção
Trawsfynydd	País de Gales	1926/1967	Fissuração	-
Upper Yarra	Austrália	-	-	-
Val De La Mare	Inglaterra	1962/1971	Fissuração	Ancoragens, injeção, redução de pressão
Warm Springs	EUA	1919/xxxx	Pequenas deteriorações na crista	-
Warsak	Paquistão	1960/1968	Fissuração	Injeção, reforço de armação, substituição do concreto danificado
Waterton	Canadá	1963/1966	Fissuração	-
Wildhorse	EUA	1937/1964	Fissuração	Substituída em 1969
Wolvekloof	África do Sul	1950/xxxx	Fissuração	-
Wayne Station	EUA	1931/xxxx	Danos superficiais	Substituição do concreto danificado

Quadro 2 – Ocorrência de reação álcali-agregado em barragens no Brasil

Fonte: Adaptado de SABBAG (2003, p.6)

Barragem	Fim da construção/Evidências da RAA	Ocorrências notadas	Tipo de reparo ou recuperação
Billings-Pedras	1936/1992	Fissuração, expansão dos pilares do vertedouro	Ajuste das guias das comportas (em estudo)
Estreito	xxxx/1996	Exsudação de gel	-
Furnas	1963/1976	Fissuração nos topos dos pilares do vertedouro, blocos de ancoragem dos condutos forçados, superfície do salto de esqui, Casa de Força, desnivelamento do coroamento entre Muro Central e blocos adjacentes	Monitoramento

<b>Barragem</b>	<b>Fim da construção/Evidências da RAA</b>	<b>Ocorrências notadas</b>	<b>Tipo de reparo ou recuperação</b>
Ilha dos Pombos	1924/1991	Fissuração nos pilares do vertedouro e paredes	Injeção de cimento, recomposição do concreto, impermeabilização de superfícies
Jaguara	1971/1996	Alteamento da crista e ovalização do estator	-
Jaguari	1977/2000	Ocorrência de RAA na tomada d'água, muro do vertedouro com quadro fissuratório intenso	-
Joanes II	1971/1988	Fissuração	-
Jurupará	1937/xxxx	Fissuração, vazamento	Atirantamento, injeção de fissuras, impermeabilização com concreto a montante.
Mascarenhas de Moraes	1957/1996	Fissuração na crista, exsudação de gel e diminuição de folgas de máquinas	Recentragem de máquinas e ajustes do mancal
Moxotó	1974/1978	Fissuração, ovalização da casa de Força, roçamento de pás de turbina	Corte de Juntas
Paulo Afonso I	1955/1978	Juntas abertas	-
Paulo Afonso II	1962/1978	Juntas abertas, deslocamento diferencial entre blocos e inclinação das pás	-
Paulo Afonso III	1973/1978	Juntas abertas, deslocamento diferencial entre blocos e inclinação das pás	-
Paulo Afonso IV	1979/1985	Fissuração, inclinação dos eixos das turbinas, ovalização do poço da turbina, redução de folgas no desnivelamento da tampa da turbina.	Em estudo
Pedro Beicht	1932/1991	Fissuração, infiltração, lixiviação	-
Peti	1945/1964	Fissuração e Alteamento da crista	Injeção de cimento, substituição do concreto superficial danificado, tratamento das fissuras, impermeabilização da face montante, em 1975; nova impermeabilização da face montante em 1984; permanência de vazamentos (1977).
Porto Colômbia	1973/1985	Exsudação de gel e ovalização do poço da turbina	Esmerilhamento de anéis.
Sá Carvalho	1951/xxxx	-	-
Tapacura	1975/1990	Fissuração, vazamento	-

Barragem	Fim da construção/Evidências da RAA	Ocorrências notadas	Tipo de reparo ou recuperação	
Traição	1940 / 1980	Fissuração, infiltrações, desalinhamento do eixo das bombas, ovalização de poço, aquecimento e desgaste de mancais-guia e travamento da comporta.	-	
Sistema Cantareira SABESP	Barragem Jaguari	1982 / 1996	RAA, detectada na crista do pilar de concreto do vertedouro.	-
	Barragem Atibainha	1973 / 1996	RAA, detectada no muro da tulipa.	-
	Barragem Cascata	1976 / 1996	RAA detectada na travessia.	-
	Barragem Paiva Castro	1972 / 1996	RAA detectada nas estruturas do vertedouro, num dos muros que delimitam o dique fusível e na bacia de dissipação.	Inspeções subaquáticas, limpeza com hidrojateamento nas estruturas metálicas e desgaste do eixo das guias da viga pescadora e da comporta ensecadeira.
	Túnel 2	1973 / 1996	RAA detectada na estrutura de emboque do túnel.	-
	Túnel 6	1974 / 1989	Ocorrência de RAA na Tomada d'água.	Ajuste e recuperação das guias das grades, modificações nas comportas ensecadeiras.
	Túnel 7	1981 / 1996	RAA detectada nos contrafortes do emboque.	-
Sistema Alto Cotia SABESP	Barragem Pedro Beicht	1932 / 1996	RAA detectada no paramento de montante é identificada pela presença de gel expansivo.	-
Sistema Rio Claro SABESP	Barragem Ribeirão do Campo	1962 / 1996	RAA detectada na estrutura da galeria.	-

## 2.2. A REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

A Reação Álcali-Agregado pode ser definida como um termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto, envolvendo os hidróxidos alcalinos (provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, materiais pozolânicos, agentes externos, etc) e alguns minerais reativos presentes no agregado utilizado. Como resultado da reação, são formados produtos que, na presença de umidade, são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos e podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto.

Alguns dos sintomas apresentados pela RAA são: fissuras tipo mapa, exsudação de gel, bordas ao redor dos agregados, descoloração do concreto, vazios ou poros preenchidos por material branco ou vítreo e fissuração da argamassa/agregado (SARKAR, et al. 2004, p.19-27). Os principais efeitos são: perda de aderência, movimentação das estruturas, perda de estanqueidade, intensa fissuração permitindo o ingresso de outros agentes agressivos e comprometimento das propriedades elásticas e mecânicas do concreto (HASPARYK, 2005, p.38).

Os principais fatores de influência atuantes na ocorrência das expansões provocadas pelas reações álcalis-agregado, segundo Bernardes (2000, p.7), são: teor de álcalis do cimento e seu consumo, contribuição de íons alcalinos de outras fontes, quantidade, tamanho, porosidade e reatividade do agregado, teor de umidade disponível junto à estrutura e tempo. Além destes, exercem grande influência a temperatura, acelerando o processo de expansão, devido à sua natureza química, e as tensões de confinamento, restringindo seus efeitos.

O processo químico de deterioração do concreto por RAA pode ser classificado de três formas (CHARLWOOD; SOLYMAR, 1994, p.31, VEIGA; GONÇALVES; ANDRADE, 1997, p.69-70; BERNARDES, 2000, p.42, NELSON, 1999, p.6):

- Reação álcali-sílica
- Reação álcali-silicato
- Reação álcali-carbonato

### 2.2.1. Mecanismos das reações álcali-sílica e álcali-sílica-silicato

Tang et al. (2000, p.110) consideram a reação álcali-silicato como uma forma de reação álcali-sílica, devido à grande semelhança, subdividindo então os tipos de reação em apenas dois.

O processo químico da reação álcali-sílica é explicado por uma reação entre a sílica do agregado reativo e os álcalis presentes na massa do concreto. Os álcalis (sódio e potássio) são comumente oriundos do cimento, podendo ser fornecidos por fontes externas (água de amassamento, agregados, pozolanas, etc.) (PAULON, 1981, p.3, SAOUMA; YUNPING XI, 2004, p.16).

Os álcalis presentes no cimento, representados pelo  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , podem ser encontrados na forma solúvel e insolúvel. Os álcalis solúveis estão presentes nos sulfatos, sendo fontes de fornecimento mais rápido à reação, enquanto os insolúveis encontram-se nas fases sólidas do clínquer (fases sulfatos e aluminatos), tendo uma interação química mais lenta, decorrente do processo de hidratação (DIAMOND, 1975, p.332).

O termo sílica refere-se a compostos de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), nas suas várias formas incluindo sílicas cristalinas, vítreas e amorfas. A estrutura básica da sílica é um arranjo tetraédrico, o qual possibilita a formação de uma rede cristalina tridimensional infinita, compartilhando-se os átomos de oxigênio de um tetraedro com os grupos vizinhos (PAULON, 1981, p.8). A sílica amorfa é a mais reativa quimicamente, sendo encontrada nas rochas do tipo opala, tridimita, calcedônia e quartzo, segundo o autor.

A estrutura química desordenada do composto amorfo interage de forma mais significativa do que a sílica cristalina, uma vez que esta se apresenta estruturalmente ordenada, como pode ser observado na Figura 1 (COLLINS, et al. 2007, p.11).

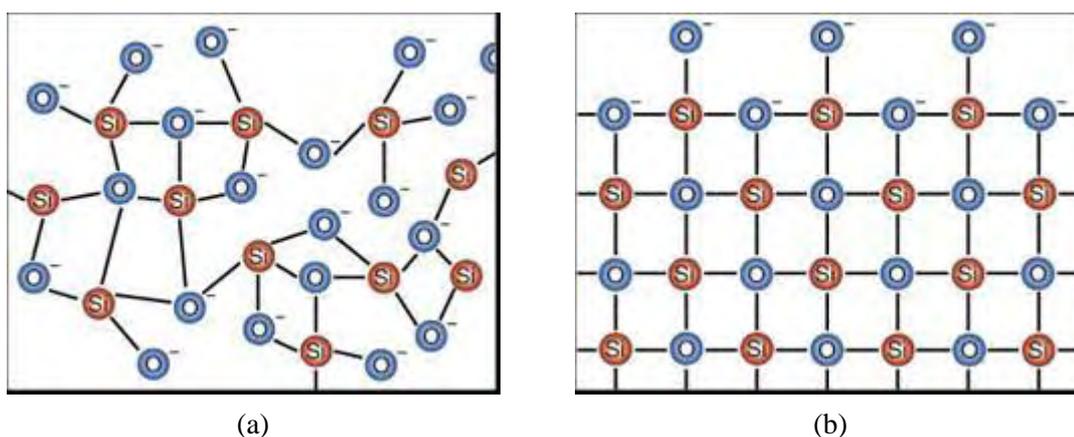
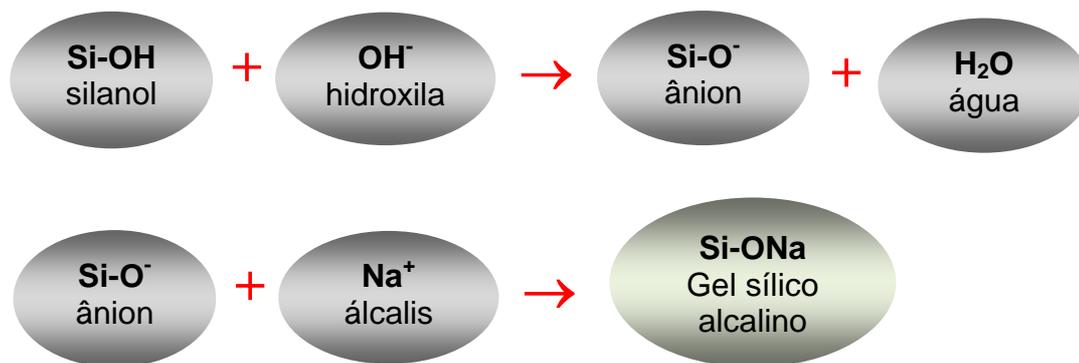


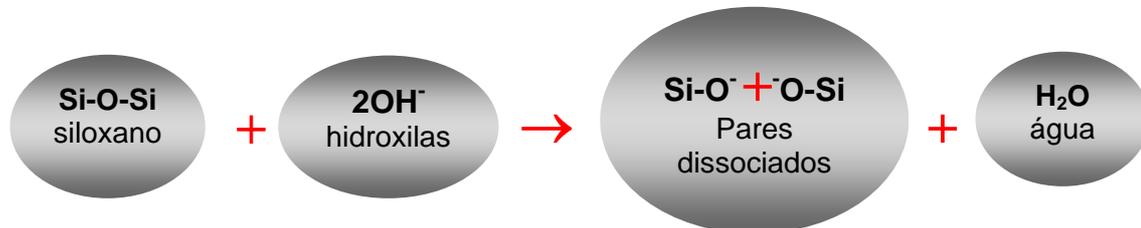
Figura 1 – Estrutura química da sílica a) Amorfa b) Cristalina

Fonte: Collins, et al. (2007, p.11)

Segundo Glasser e Kataoka (1981, p.3), o estágio inicial da reação é definido como sendo do tipo ácido-base no qual o grupo silanol (Si-OH), presente na superfície da sílica, é atacado pelos íons hidroxilas (OH<sup>-</sup>), liberando água. Os cátions presentes no meio são atraídos se associando à estrutura deste grupo, desbalanceado negativamente pelo SiO<sup>-</sup>, formando um gel sílico alcalino.



A ocorrência de íons hidroxila em excesso, numa segunda etapa, interage com o grupo siloxano (Si-O-Si), quebrando suas ligações e substituindo-o por pares de SiO<sup>-</sup> como mostra o esquema a seguir.



O gel sílico alcalino se caracteriza por ser hidrófilo, e sob condição de umidade, aumenta volumetricamente gerando tensões suficientes que podem danificar a estrutura do concreto (COLLINS, et al. 2007, p.18).

A quantidade de água e álcalis ocasiona variação do volume específico e a densidade do gel, sendo normalmente superior ao volume da sílica, criando as pressões expansivas. Além disso, o gel geralmente não é muito solúvel concentrando-se comumente ao redor dos agregados. Quanto mais fluido pode exsudar na superfície do concreto durante o seu processo de expansão (GLASSER; KATAOKA, 1981, p.5).

Na Figura 2, segue ilustrado o mecanismo de formação do gel da RAA no concreto.

O próximo item abordará, de forma mais detalhada os principais aspectos e características envolvidos na reação do tipo álcali-silicato, uma vez que este assunto é escopo do trabalho desenvolvido.

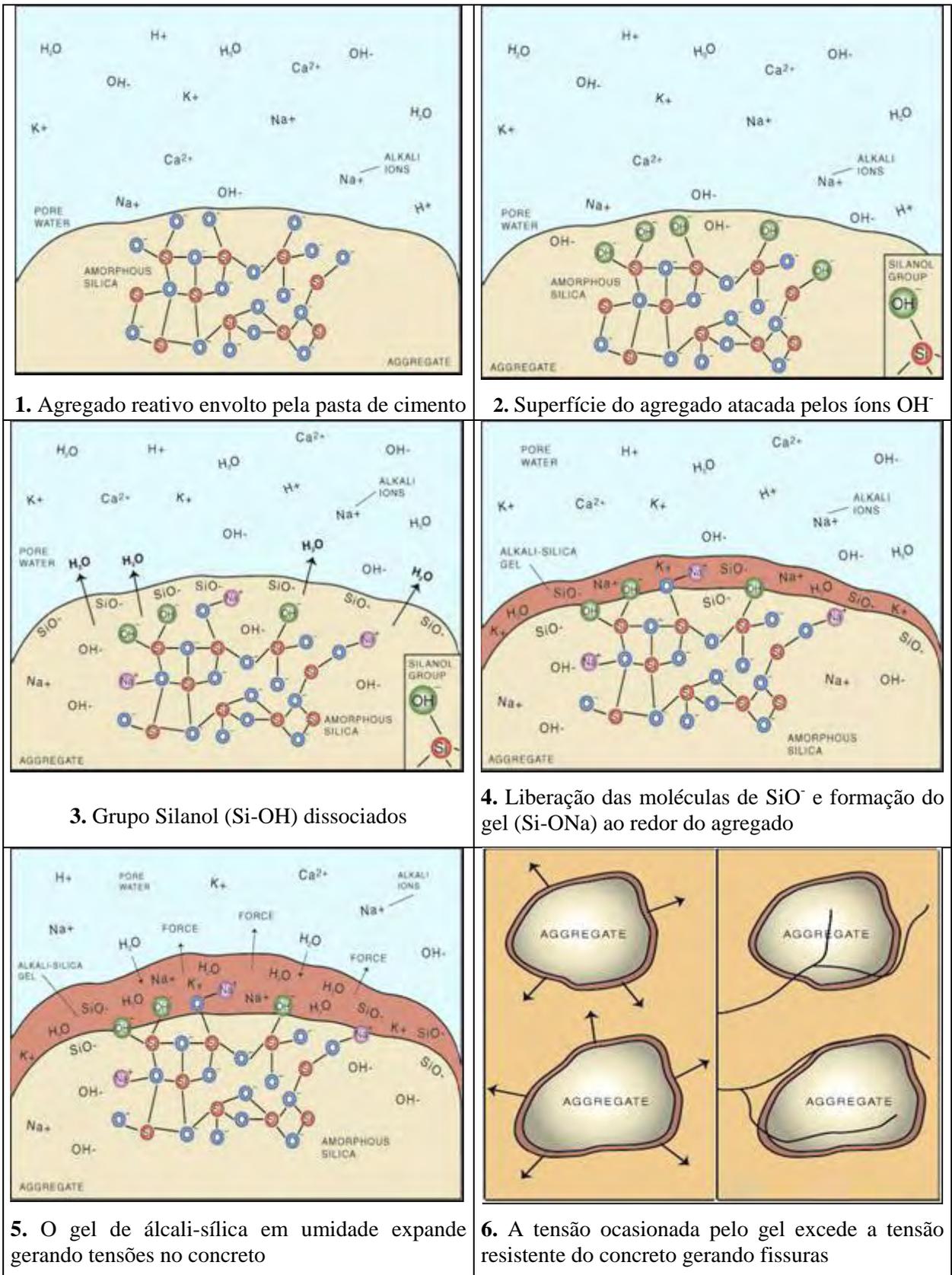


Figura 2 – Mecanismo de formação do gel da RAA

Fonte: Collins, et al. (2007, p.14-19)

### 2.2.2. Reação álcali-sílica-silicato

As reações álcali-sílica-silicato (RASS) são semelhantes às reações álcali-sílica (RAS). A diferença entre as RAS e as RASS está no tipo de rocha que apresenta a sílica amorfa. No primeiro caso, os agregados são constituídos quase que exclusivamente por sílica, como quartzo, opala, calcedônia, etc.; no segundo, a sílica amorfa provém de agregados de rochas polifásicas, como feldspatos, piroxenas, anfíbolos, etc., em que se apresenta combinada com outros elementos sob a forma de silicatos. Por esse motivo, as taxas de evolução das RAS são superiores às das RASS, segundo Bernardes (2000, p.44).

Outra característica importante que difere as RAS das RASS, além da diferença da taxa de evolução apresentada, segundo Monteiro (2002), é dada pelo surgimento de um depósito esbranquiçado ao redor do grão e por uma região escurecida que aparece na zona de transição – região definida entre a pasta de cimento e o agregado graúdo, conforme ilustrado pela Figura 3.



Figura 3 – Características das reações álcali-sílica-silicato

Fonte: Monteiro (2002)

É o tipo de reação mais encontrado no Brasil. A maior parte das barragens que apresentam esse tipo de deterioração em nosso país foi construída com rochas do tipo quartzofeldspáticas tais como quartzito, granito e gnaisses, com ocorrências distribuídas por vasta faixa territorial. Isto justifica a grande ocorrência de reação álcali-silicato (VALDUGA, 2002, p.18).

De acordo com Kihara (1986, p.129) alguns exemplos de barragens afetadas por este tipo de reação são: Barragem Apolônio Sales (Moxotó), Joanes, Paulo Afonso, Barragem de Pedras e Barragem de Billings.

Paulon (1981, p.21) comenta que Van Aardt e Visser (1977) propuseram uma teoria para explicar como os feldspatos podem ser um material reativo. Essa teoria tem como

sustentação o fato de que nas primeiras idades do concreto ou argamassa desenvolve-se uma camada de aderência em torno do agregado formada de silicatos de cálcio hidratados e hidróxido de cálcio (Figura 4a). Com o tempo, e em condições de umidade, o hidróxido de cálcio reage com o feldspato liberando álcalis sob a forma de KOH e NaOH e/ou silicatos de sódio e potássio, sendo este último sob a forma de gel e parcialmente solúvel em água. Quando os álcalis atingirem certa concentração, os silicatos de cálcio (camada de aderência) tenderão a se dissolver em silicatos de sódio e potássio formando um gel contendo cálcio, potássio, sódio e sílica em sua vizinhança (Figura 4b). Este gel constitui um mau elemento de ligação, especialmente se considerarmos que está sujeito a contrações e dilatações conforme perda ou ganho de água.

A presença de quartzo deformado, com elevado grau de extinção ondulante, é destacada na relação de agregados álcalis-reativos do U.S. Bureau of Reclamation, incluindo grauvaca, argilito, arenito quartzoso, quartzito, hornfels, quartzo-biotita, gnaisse, granito, filito e ardósia segundo Prizskulnik (2007, p.17).

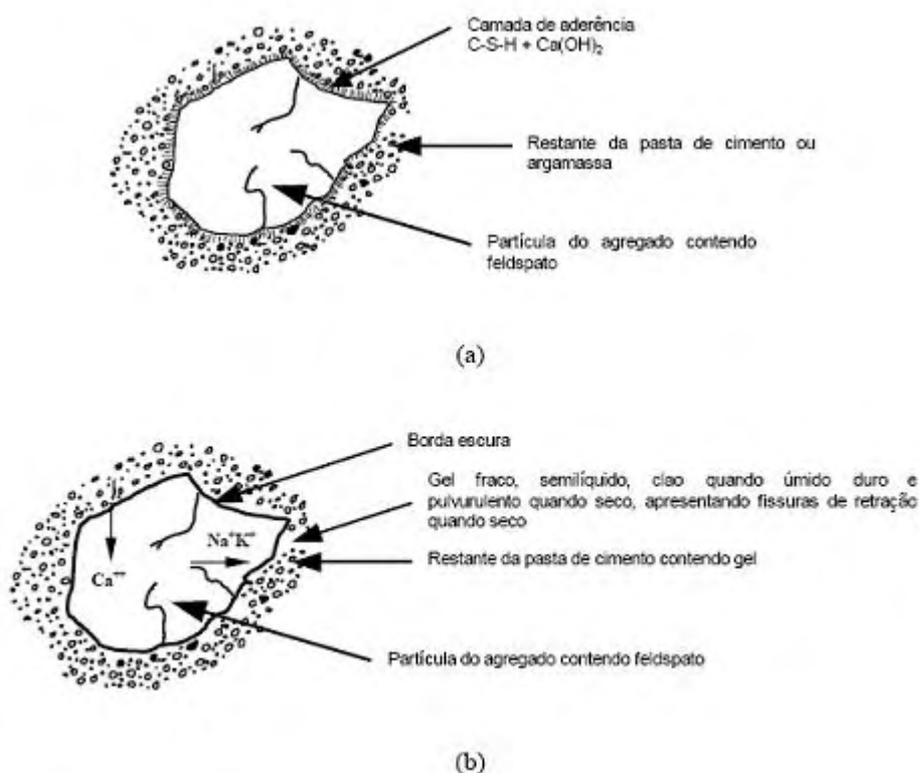


Figura 4 – Características do agregado antes (a) e depois da reação (b)

Fonte: Van Aardt e Visser (1977)

Kihara e Pecchio (2006, p.91) também confirmam que, em agregados “granitóides” e quartzíticos, a principal fase reativa, responsável pela reação álcali-silicato, é o quartzo deformado com ângulo de extinção ondulante acima de 25°.

## 2.3. EFEITOS DA RAA SOBRE O CONCRETO

### 2.3.1. Deformações causadas pela RAA

A RAA provoca no concreto um processo expansivo que pode ser dividido em quatro fases, segundo Rodrigues (2002, p.11).

- **1ª Fase:** o gel expansivo começa a preencher os vazios do material, porém os efeitos da RAA ainda não são sentidos;

Essa fase depende do tempo, que varia para cada obra. Geralmente para barragens as manifestações iniciais ocorrem depois dos dez primeiros anos.

- **2ª Fase:** após o total preenchimento dos vazios, observa-se uma taxa de crescimento aproximadamente constante e pequena;
- **3ª Fase:** a taxa de expansão aumenta bruscamente;
- **4ª Fase:** com o término dos componentes químicos disponíveis, a taxa de expansão diminui até se anular.

O autor comenta que o período de tempo envolvido em cada fase e a magnitude final das expansões varia em função de vários fatores. Em alguns casos, o tempo envolvido nas duas primeiras fases é muito pequeno, dessa forma a curva inicial pode ser dada pela linha tracejada da Figura 5, que ilustra o comportamento da reação nas várias fases citadas.

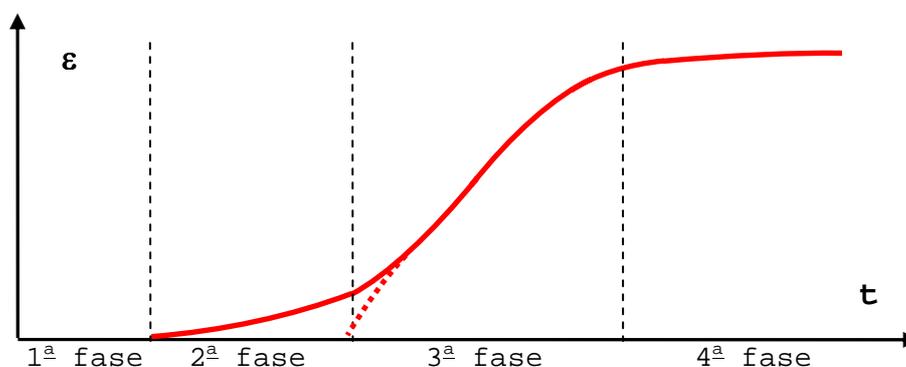


Figura 5 – Desenvolvimento da RAA

Fonte: Adaptada de Cyr e Carles-Gibergues (2002, p.3)

Já do ponto de vista mecânico, as reações álcali-sílica-silicato podem ser descritas conforme esquema ilustrado na Figura 6.

Não há ainda dados que permitam estabelecer cronologicamente o início e o término de uma reação álcali-agregado. O que se tem é um extenso número de variáveis causadas por diferentes materiais e condições climáticas do local do empreendimento. Acredita-se, que com o passar do tempo, os efeitos desta reação vão diminuindo até se tornarem inócuos.

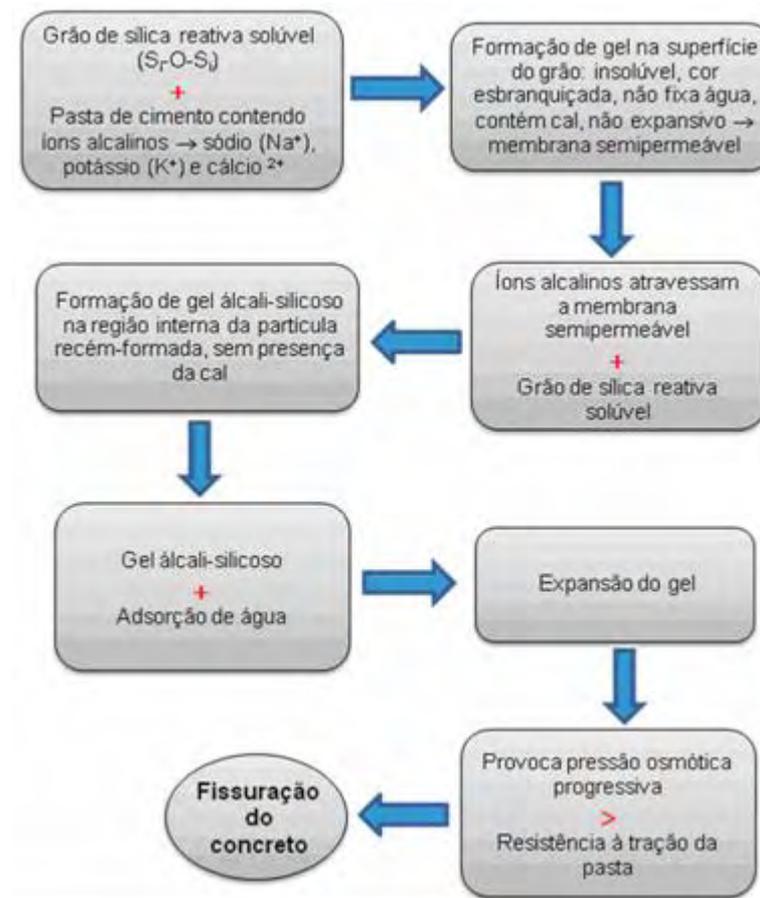


Figura 6 – Mecanismo das expansões e fissuração

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2002, p.13)

### 2.3.2. Expansões residuais

Segundo Charlwood e Solymar (1994, p.32) há relatos de barragens onde as expansões cessaram após 30 anos, como por exemplo, Stewart Mountain, EUA; e outras, que com mais de 50 anos de existência, ainda registram expansões deletérias, como a barragem de Fontana, EUA. Contudo, os casos em que as reações cessaram são as do tipo álcali-sílica, e não para casos de baixas taxas de expansão, como as das reações álcali-silicato.

De acordo com Charlwood e Solymar (1994, p.42) foram realizados ensaios pelo método acelerado em testemunhos extraídos da barragem de Mactaquac no Canadá, para correlacionar o tempo e a taxa de expansão. Os ensaios revelaram uma baixa redução das expansões com o tempo, não indicando o seu término. Realizaram-se também ensaios em barras de argamassa e testemunhos de concreto expostos por um longo período de tempo, resultando em expansões remanescentes de aproximadamente  $500$  a  $750 \times 10^{-6}$  m/ano para as barras de argamassa e  $500 \times 10^{-6}$  m/ano para os testemunhos de concreto. Esses dados, segundo os autores, não são consistentes com os medidos “in situ”, onde as taxas de expansão são de aproximadamente  $140 \times 10^{-6}$  m/ano.

Os ensaios acelerados realizados em laboratório são questionados na avaliação do término das expansões por não submeter o concreto ao mesmo ambiente existente “in situ”.

Shayan e Grimstad (2006, p.374) realizaram estudos em uma barragem afetada pela RAA na Austrália. A pesquisa incluiu a caracterização da condição atual do concreto, a determinação do potencial futuro da expansão e as recomendações para o reparo dos danos à estrutura. Foram extraídas amostras para realização de inspeção visual, análises petrográficas, microscopia eletrônica de varredura, quantificação dos álcalis residuais e expansão residual, assim como, ensaios para avaliar as propriedades mecânicas do concreto. Adicionalmente, foi coletado do local da construção, agregado graúdo do tipo granito gnáissico. O agregado foi estudado em laboratório para determinar seu potencial de expansão e para permitir uma estimativa da expansão máxima que ele poderia causar.

Os resultados de expansão residual obtidos por Shayan e Grimstad (2006, p.381), em testemunhos armazenados durante um ano, indicaram que movimentos de  $1,2$  a  $2,0 \times 10^{-3}$  m/ano poderiam ser esperados no muro da barragem. Contudo, devido às diferenças nas condições do armazenamento em laboratório para a condição em campo, os autores realizaram uma correção no valor dos movimentos, obtendo:  $0,6$  até  $1,0 \times 10^{-3}$  m/ano.

Shayan e Grimstad (2006, p.381) dividiram em três grupos os testemunhos retirados do muro da barragem. Sendo, DW-1 – testemunhos retirados de bloco pouco afetado pela RAA, DW-2 – testemunhos retirados de um bloco medianamente afetado e DW-3 – testemunhos retirados de um bloco severamente afetado pela RAA, apresentando intensa fissuração. O ensaio mostrou que para o grupo DW-3 há um potencial expansivo remanescente baixo, como mostra a Figura 8, em contrapartida, o grupo DW-1, foi o que apresentou as maiores taxas de expansão dos três grupos estudados (Figura 9).

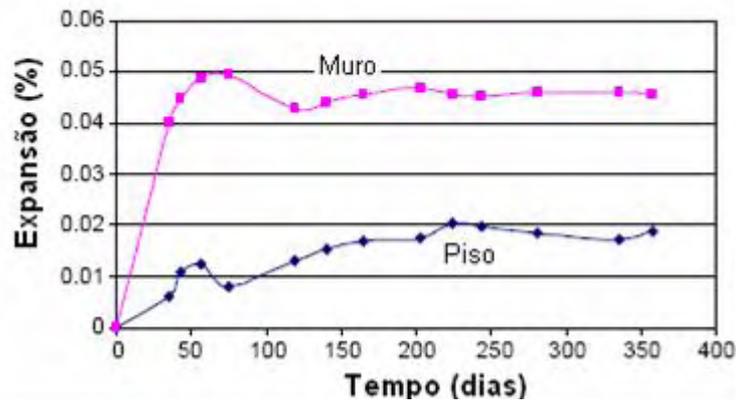


Figura 7 – Expansão devida à RAA em testemunhos extraídos do muro e do piso de uma barragem  
 Fonte: Shayan e Grimstad, (2006, p.381)

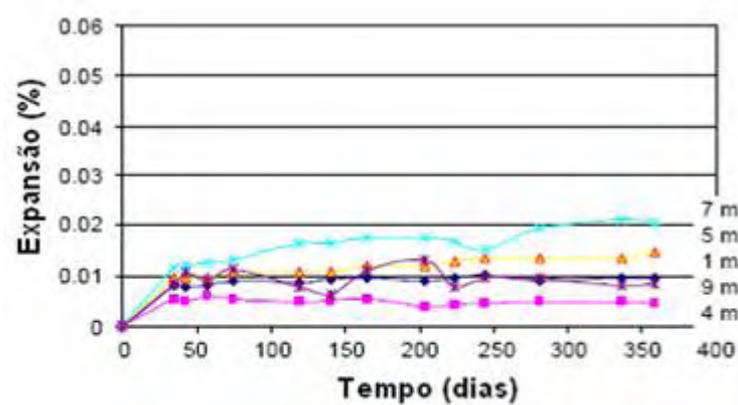


Figura 8 – Expansão em testemunhos retirados do bloco DW-3  
 Fonte: Shayan e Grimstad, (2006, p.381)

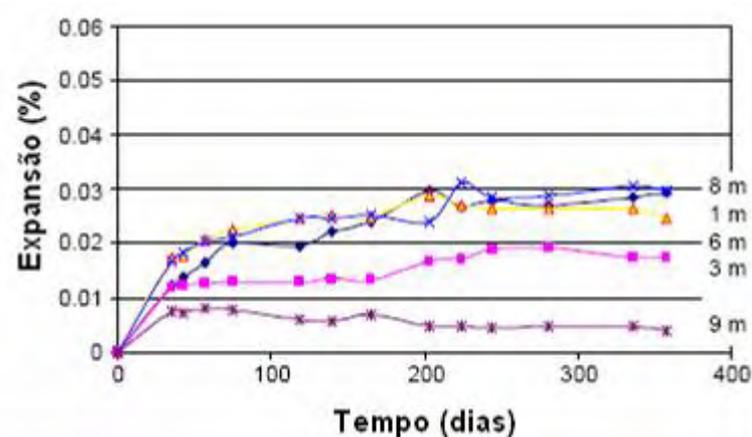


Figura 9 – Expansão em testemunhos retirados do bloco DW-1  
 Fonte: Shayan e Grimstad, (2006, p.381)

Kuperman et al. (1997, p.131) realizaram ensaios de expansão em corpos-de-prova extraídos da Tomada d'água do Túnel 6 do Sistema Cantareira, pertencente à SABESP, com o

objetivo de avaliar o potencial expansivo ainda remanescente, submetidos a diversas condições de ensaio. Os pesquisadores verificaram que independente da condição de exposição considerada, as expansões continuam a ocorrer devido à presença dos componentes que influenciam a reação álcali-agregado: quartzo deformado sob tensão, álcalis (principalmente potássio), água e temperatura.

Os estudos das expansões residuais realizados por Hasparyk (2005, p.143) em várias amostras de testemunhos extraídos, quando submetidas à condição de elevada umidade e temperatura de 38°C, indicaram que os agregados presentes ainda possuem minerais potencialmente reativos para reagir e manter a reação por algum tempo, mostrando a existência de expansões residuais.

Os estudos realizados por Sabbag (2003, p.112) em testemunhos extraídos submetidos à solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1N, mostraram que os mesmos possuem capacidade de expansão, com variação de comprimento de até 0,2 %. Esse resultado comprova que existem ainda, no concreto, substâncias que permitem a continuidade da reação.

### **2.3.3. Influência do agregado**

Os agregados reativos são uma das principais causas de RAA por conterem minerais de dióxido de sílica (SiO<sub>2</sub>). Alguns desses minerais são cristalinos, como a tridimita, a cristobalita e o quartzo tensionado, etc, enquanto outros são amorfos, como a opala, chert e materiais de vidros vulcânicos. Outros tipos de agregados reativos são compostos por ambos os materiais, produtos cristalinos e amorfos, incluindo grauvacas e filitos (SAOUMA; YUNPING XI, 2004. p.15)

Zhang et al. (1999) investigaram o efeito do tamanho dos agregados e sua influência na RAA. Os autores concluíram que as expansões em barras de argamassas contendo agregados reativos aumentam com a redução do tamanho das partículas, conforme visualizado na Figura 10.

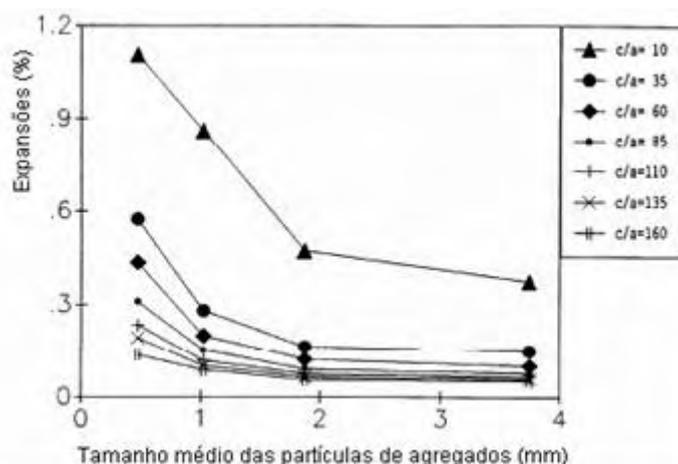


Figura 10 – Relação entre expansão de argamassas e tamanho médio dos agregados  
 Fonte: Zhang, et al. (1999)

Em particular, a expansão do concreto que contém agregados miúdos (partículas menores) cresce principalmente no início do processo expansivo e tende a se estabilizar mais rapidamente também. Por outro lado, a expansão do concreto que só contém agregados graúdos (partículas maiores) acontece lentamente, mas continuam por um período de tempo maior (SAOUMA; YUNPING XI, 2004, p.16).

### Influência de agregados graníticos

Owsiak (2004, p.7) apresentou resultados da influência da combinação de cimento Portland altamente alcalino com agregado granítico. O autor comenta que durante um período de 18 meses, as barras de concreto mostraram uma pequena linearidade nas expansões, um pouco abaixo de 0,1%, como visualizada na Figura 11, o que permitiu classificar o agregado como não reativo. Entretanto, expansões significativas foram observadas depois dos 21 meses e depois dos 30 meses, alcançando valores de 0,6 %.

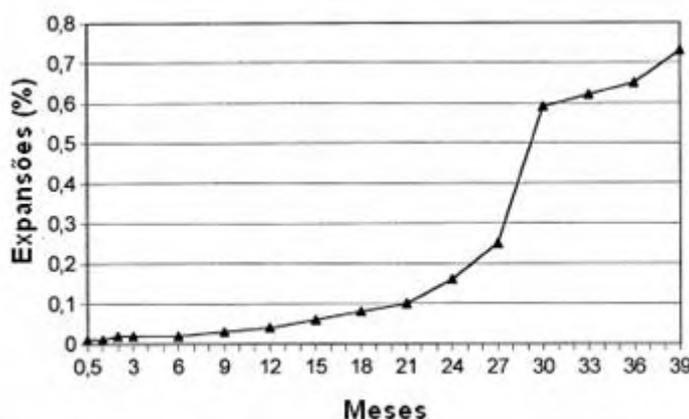


Figura 11 – Expansão de barras de concreto confeccionadas com agregado granítico, armazenadas em ambiente fechado a 38°C e umidade acima de 85%  
 Fonte: Owsiak, (2004, p.9)

Munhoz (2007, p. 111) comenta que as fases reativas do quartzo microgranular, recristalizado, com extinção ondulante e cristais de quartzo e feldspato deformados, do milonito granítico, por sua vez, dão origem ao tipo de reação álcali-silicato.

Segundo o autor, as fases reativas do milonito granítico são cristalizadas e as estruturas cristalinas do quartzo e feldspato são desordenadas devido a esforços tectônicos, o que lhes confere reatividade com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros. Além da cinética da reação, o produto da RAA também difere na composição química e na mobilidade. O produto da reação predominante no agregado milonito granítico é formado por sílica, sódio e cálcio. As feições microtexturais sugerem que a mobilidade do gel da reação álcali-silicato seja maior, pois quase todos os poros estão preenchidos por gel gretado. Já o gel da reação álcali-sílica é encontrado preferencialmente na superfície dos grãos, o que sugere maior viscosidade e menor mobilidade.

### **Contribuição dos álcalis do agregado**

Com relação ao progresso da reação, é difícil a previsão de seu término, já que a fonte de álcalis pode não ser só o cimento, mas também alguns minerais presentes em certos agregados, tais como os feldspatos, e as micas (KUPERMAN, et al., 1997, p.130). Hobbs (1990) relata que quando os álcalis são predominantemente oriundos do cimento Portland, as expansões são observadas por um período de 8 a 15 anos. Entretanto, quando os álcalis são provenientes de agregados, a expansão é estendida por um período de tempo maior.

Os feldspatos e as micas são as fases minerais mais suscetíveis de contribuir com os álcalis na solução dos poros do concreto. Na deterioração da barragem de Chambon na França, acredita-se que a quantidade significativa de álcalis fornecida à solução dos poros do concreto foi feita pelas micas e pelos feldspatos presentes em partículas de agregados do tipo gnaiss e granito (DUYOU LU, et al. 2006, p.1157).

Baseado em investigações de laboratório, Bérubé et al. (2002) verificaram que a quantidade de álcalis que poderia ser fornecida à solução dos poros de concreto por agregados poderiam variar de 0,1 a 12,7 kg/m<sup>3</sup> de Na<sub>2</sub>Oe, a longo prazo, dependendo do tipo da rocha. Se o agregado fosse potencialmente reativo com os álcalis, a liberação mesmo que em pequenas quantidades de álcalis do seu interior, poderia, com o tempo, ter um impacto significativo na durabilidade do concreto. Ou seja, a deterioração por RAA em algumas estruturas de concreto construídas com cimento com baixo teor alcalino (menos do que 3 kg/m<sup>3</sup> de Na<sub>2</sub>O) pode ser explicada pela lixiviação dos álcalis dos agregados.

Na Figura 12 e 13 são apresentados a quantidade de Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O liberados pelo agregado granítico e gnáissico respectivamente, mantidos em água e solução saturada de Ca(OH)<sub>2</sub>, à 80°C.

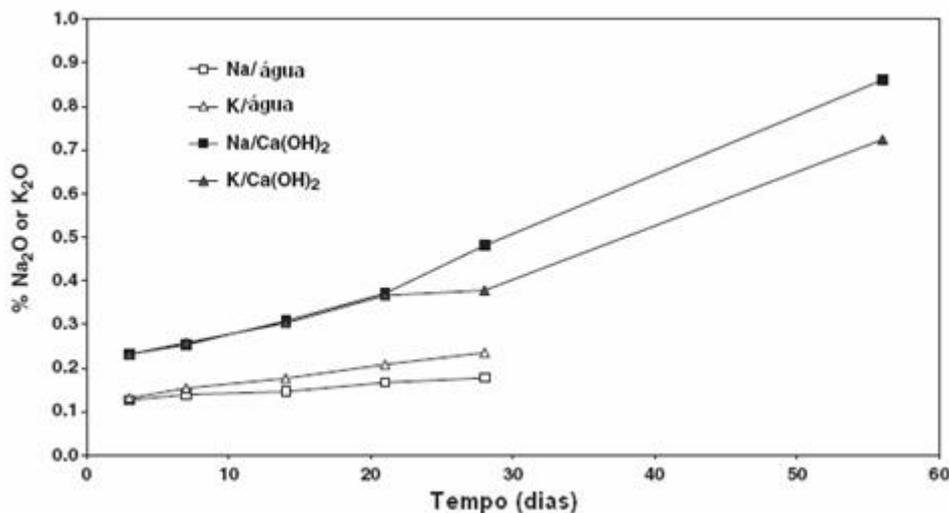


Figura 12 – Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O liberados pelo agregado granito com tamanho variando entre 0,15 e 0,08 mm, mantidos em água destilada e solução super saturada de Ca(OH)<sub>2</sub>, à 80°C.

Fonte: Duyou, et al, (2006, p.1159)

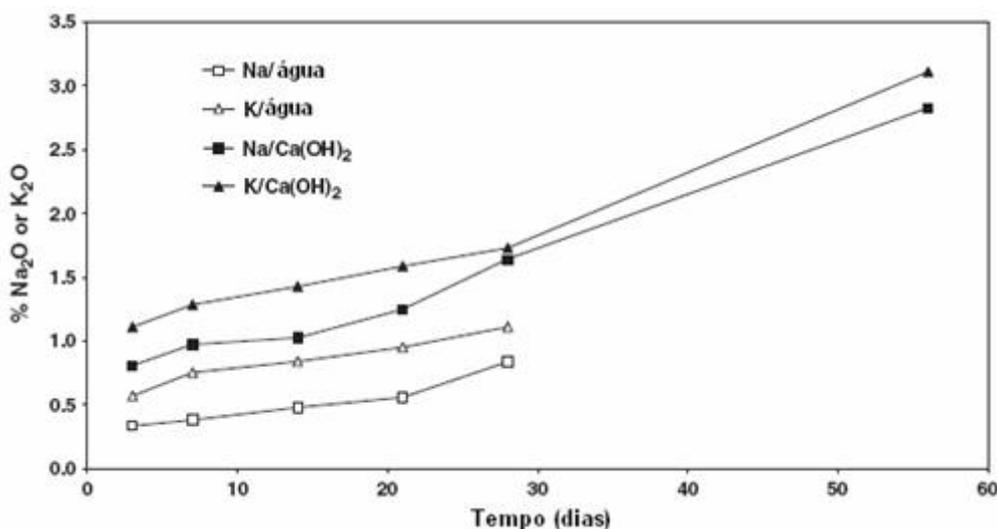


Figura 13 – Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O liberados pelo agregado gnáissico com tamanho variando entre 0,15 e 0,08 mm, mantidos em água destilada e solução super saturada de Ca(OH)<sub>2</sub>, à 80°C

Fonte: Duyou, et al, (2006, p.1160)

Duyou, et al. (2006, p. 1160) relataram em seu artigo que Poteras (2000) realizou um teste baseado na ASTM C227, estendendo este ensaio até que a RAA cessasse. Em seguida, o agregado foi separado da argamassa e uma nova série de barras foi preparada usando outro tipo de cimento. Monitorando a evolução da expansão das barras de argamassa, verificou-se

que as expansões tinham recomeçado seu ciclo com valores significativos. Isto implica que o potencial reativo do agregado não estava completamente esgotado e que uma variação das condições ambientais favoráveis à reação pode reiniciar o processo expansivo.

Na pesquisa de Munhoz (2007, p.111) produtos cristalizados da reação álcali-silicato também foram encontrados dentro dos grãos de agregado, sugerindo que os íons de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$   $\text{OH}^-$  penetraram no grão e reagiram com a sílica. A reação rompeu as ligações químicas dos silicatos e tornou frágil a estrutura dos grãos. Segundo o autor, o teor pouco expressivo de  $\text{K}_2\text{O}$  solúvel das barras de argamassa indica que a maior parte deste álcali proveniente dos cimentos estava presente no produto da reação álcali-agregado. O  $\text{Na}_2\text{O}$  solúvel determinado nas barras de argamassa provém essencialmente da solução alcalina. Há assim, segundo o pesquisador, uma disponibilidade inesgotável de álcalis e, conseqüentemente, de íons hidroxila necessários à reação.

#### 2.3.4. Lixiviação dos corpos de prova

Segundo Thomas et al. (2006, p.1846) as diferenças de expansão, obtidas em prismas de concreto, da condição em laboratório para a condição em campo, para concretos confeccionados com um mesmo agregado, deve-se à lixiviação. Muito embora, no caso de prismas de concreto o problema da lixiviação seja maior que no caso de barras de argamassa (devido a uma maior seção transversal dos prismas), este problema pode ocasionar a distorção da resposta do ensaio.

A Figura 14 apresenta a variação da concentração alcalina na água do recipiente de armazenamento, devido a lixiviação.

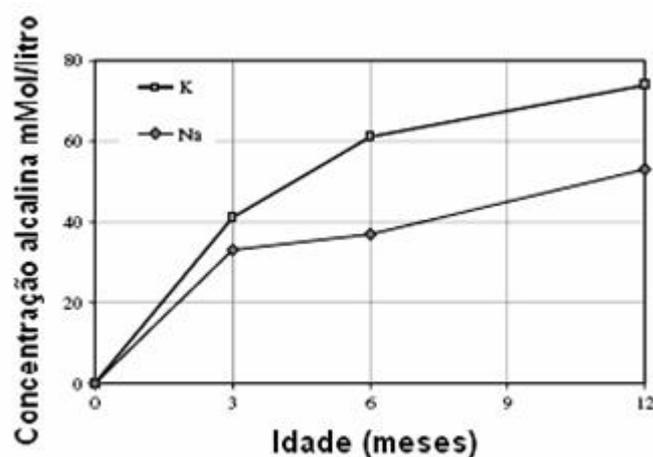


Figura 14 – Variação da concentração alcalina na película de água do ensaio ASTM C 1293 com o passar do tempo

Fonte: Thomas, et al (2006, p.1846)

Segundo Rivard, et al. (2003, p.1148), algumas medidas para tentar minimizar a lixiviação podem ser tomadas, como a cobertura dos corpos de prova com capa de plástico.

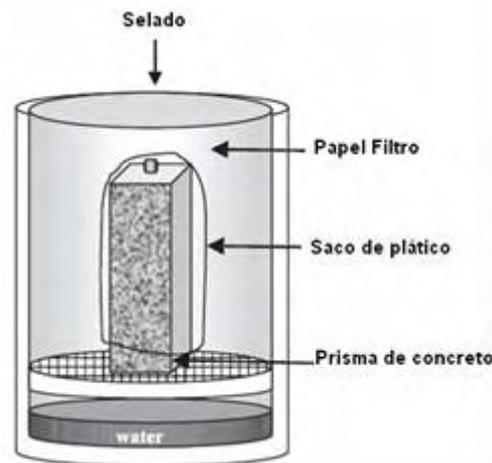


Figura 15 – Corpos de prova cobertos com capa de plástico para a inibição da Lixiviação

Fonte: Rivard, et al. (2003, p.1148).

No ensaio de prismas de concreto submetidos a temperaturas elevadas, a lixiviação dos corpos de prova é maior, se comparados ao ensaio em barras de argamassas. Segundo Fournier, et al. (2004) *apud* Sanchez (2008, p.79) a lixiviação é tanto maior quanto maior a temperatura, como visualizada na Figura 16.

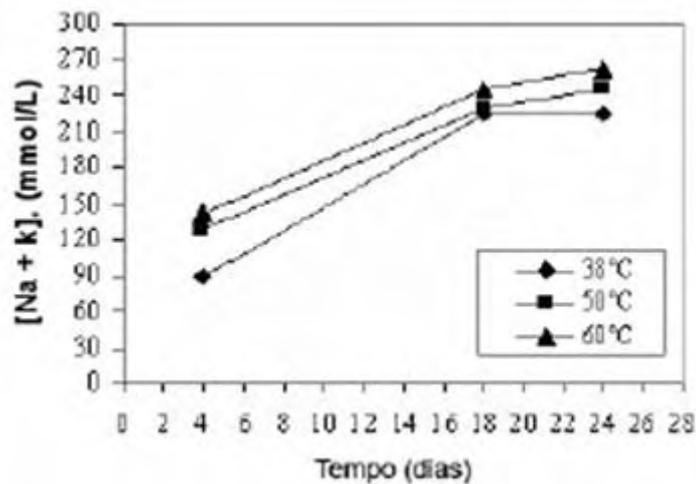


Figura 16 – Concentração de álcalis na película de água do ensaio de prismas de concreto proveniente da lixiviação

Fonte: Fournier, et al. (2004) *apud* Sanchez, (2008, p.79)

### 2.3.5. Alterações das propriedades mecânicas do concreto

De uma maneira geral, pode-se dizer que as propriedades mecânicas do concreto são efetivamente afetadas pela reação álcali-agregado. Muitos autores estudaram o efeito da reação nas propriedades mecânicas do concreto (SIEMES; VISSER, 2000, JONES; CLARK, 1996, KOYANAG; ROKUGO, 1996). A maioria deles concorda que a reação afeta a resistência à tração e o módulo de elasticidade do concreto.

#### ➤ Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Segundo Giaccio, et al. (2008, p.993) as reduções na resistência à compressão são sempre mais baixas, sendo em alguns casos, não afetada pela RAA. Os autores realizaram testes mecânicos em concretos afetados e os resultados mostraram reduções significativas nas propriedades elásticas (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson). De acordo com os pesquisadores, as propriedades mecânicas dos concretos preparados com agregados reativos diminuem enquanto a reação álcali-agregado aumenta.

O Laboratório CESP de Ilha Solteira, Núcleo de Concreto, efetuou um estudo sobre o efeito da RAA em blocos de concreto moldados em 1971, com dosagens utilizando vários tipos de agregados e aglomerantes. Os blocos foram expostos as intempéries e o seu comportamento verificado por meio de ensaios de ruptura à compressão, observações visuais e medidas de deformação. Os ensaios de resistência à compressão executados até a idade de 5 anos, não mostraram diminuição substancial nesta propriedade (PAULON, 1981, p.97).

No trabalho apresentado por Hasparyk (2005, p.179) as propriedades mecânicas, resistência à compressão e módulo de elasticidade, foram analisadas com o objetivo de verificar o seu comportamento no tempo durante o ataque da RAA. A partir dos resultados obtidos para todas as amostras analisadas, foi estimado um tempo equivalente à idade que o concreto teria nas condições de deterioração na qual se encontrava, conforme as Figuras 17 e 18.

Os dados experimentais com os testemunhos de concreto e a sua modelagem permitiram constatar que enquanto o módulo cai, a resistência pode aumentar até atingir um pico a partir do qual passa a cair ao longo do tempo, segundo a pesquisadora.

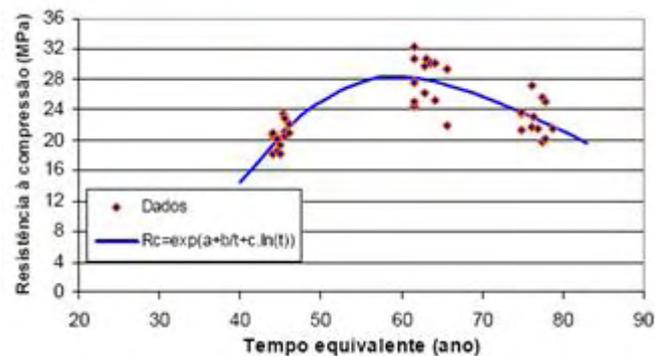


Figura 17 – Modelo referente à resistência a compressão e resultados de ensaio

Fonte: Hasparyk (2005, p.180)

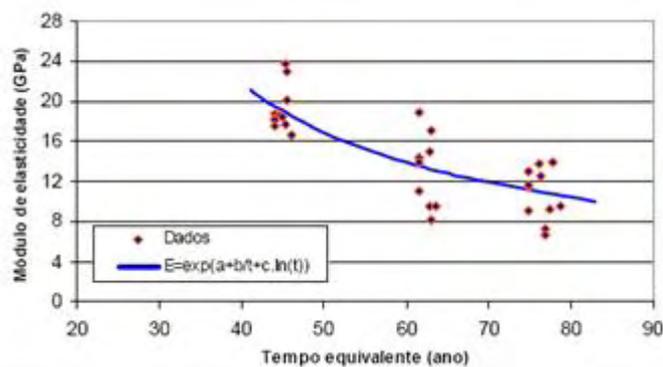


Figura 18 – Modelo referente ao módulo de elasticidade e resultados de ensaios

Fonte: Hasparyk (2005, p.181)

Estudos realizados em laboratório por Castro, et al. (1997, p.50), envolvendo testemunhos de concreto extraídos de pilares do vertedouro da UHE de Furnas, indicaram queda no módulo de elasticidade de cerca de 50%, apesar da resistência ter-se apresentado satisfatória. De acordo com os autores, esse comportamento pode ser atribuído às microfissuras e aos géis, especialmente concentrados nos poros, preenchendo vazios no concreto, assim como na interface agregado/argamassa.

Estudos realizados por Sabbag (2003, p.99) em testemunhos extraídos da barragem de Mascarenhas mostraram que não houve efeitos negativos na resistência à compressão e no módulo de elasticidade, ocasionados pela RAA. Os valores médios de 26,2 MPa e 25 GPa para os ensaios de compressão simples e módulo de elasticidade respectivamente, mostram-se compatíveis com concretos executados no mesmo período e com as mesmas características.

Silva (2007) realizou ensaios em testemunhos extraídos de algumas partes das estruturas das usinas do Complexo Paulo Afonso da CHESF. A autora verificou que a RAA se desenvolve de maneira variável na massa de concreto, concluindo que os estudos

realizados em concretos extraídos de estruturas afetadas pela reação álcali-agregado são muito pontuais, e generalizá-los incorre à erro. Os resultados dos ensaios obtidos por Silva (2007) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados das propriedades mecânicas obtidos por Silva (2007)

Propriedades	Resultados
Resistência à compressão	Pouco influenciada pela RAA.
Resistência à tração por compressão diametral	Foi muito similar ao da resistência à compressão. A correlação entre resistência à tração por compressão diametral com a resistência à compressão apresentou-se na faixa entre 5% e 10%.
Módulo de elasticidade	Os valores obtidos foram aproximadamente, 35% inferiores aos encontrados para concretos não afetados pela RAA, indicando uma maior sensibilidade desta propriedade aos efeitos da reação.
Coefficiente de Poisson	Apresentou valores similares aos encontrados em concretos sãos, ou seja, não afetados pela RAA.
Fluência	Pouco afetada pela RAA nos concretos das usinas em estudo.

Segundo Marzouk e Langdon (2003), elementos de concreto convencional deteriorados pela RAA podem ter uma queda de resistência à compressão de 20 a 30%, enquanto o módulo de elasticidade pode cair em até 80%.

Smaoui, et al. (2005, p.203) estudaram o aumento da concentração alcalina de concreto com 0,6% a 1,25% de  $\text{Na}_2\text{O}$  da massa de cimento, adicionando NaOH à água de mistura. Os autores verificaram que esta adição tem efeitos prejudiciais na maioria das propriedades mecânicas (resistência à compressão, tração direta e diametral, tração na flexão e módulo de ruptura) de concretos feitos com uma relação água-cimento de 0,41 e agregado calcário. A adição de álcalis sob a forma de NaOH causa significativas reduções nas propriedades mecânicas do concreto em todas as idades, como visualizada na Figura 19. Os autores atribuem esta queda à uma pasta mais reticular e mais porosa do concreto.

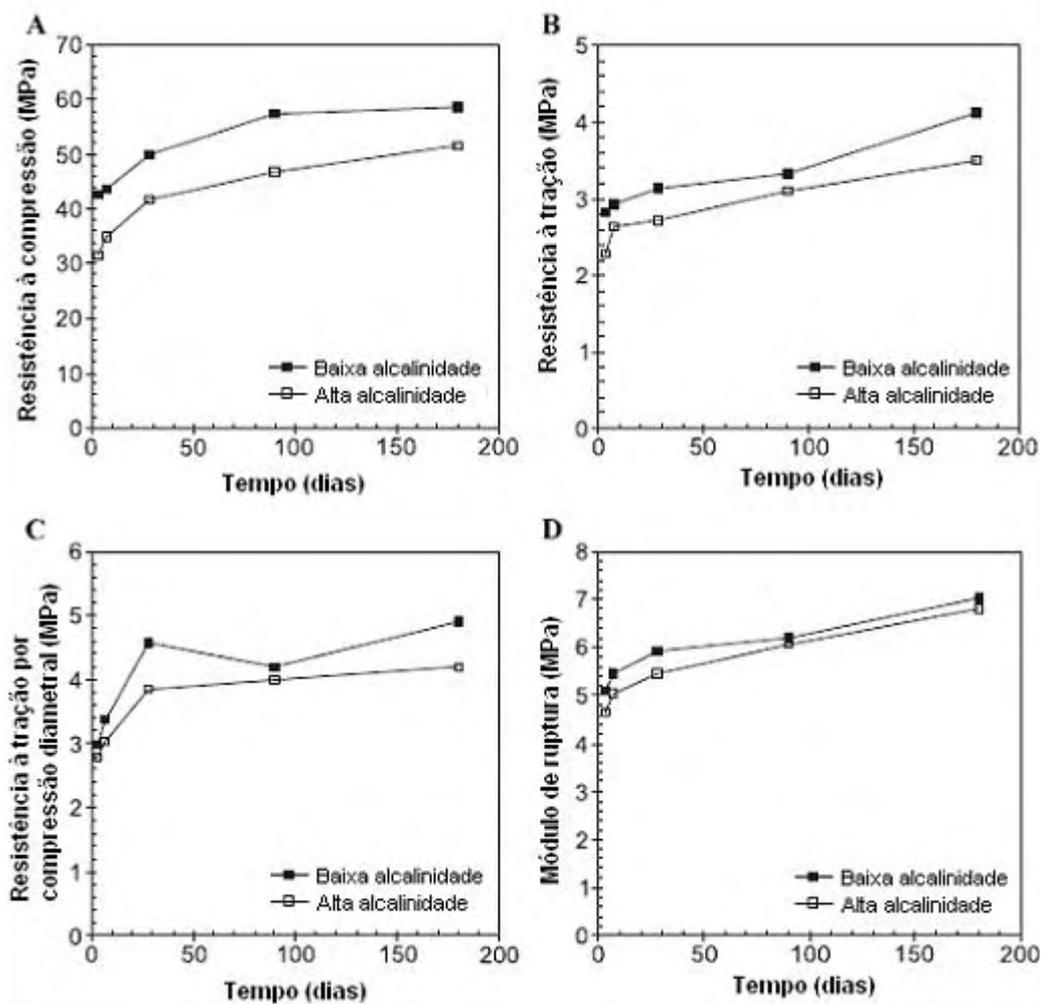


Figura 19 – Resultado dos ensaios mecânicos em função do tempo: (A) Resistência à compressão, (B) Resistência à tração direta, (C) Resistência à tração diametral, (D) Módulo de ruptura.

Fonte: Smaoui, et al. (2005, p.208)

### ➤ Resistência à tração

Segundo Andriolo (1997, p.260) a resistência à tração e o módulo de elasticidade são afetados pela RAA, sendo que ambas podem afetar o desempenho e a integridade das estruturas de concreto. Entretanto essa perda de propriedade segundo o autor, não ocorre ao mesmo tempo, ou na mesma proporção da expansão.

Os estudos de Hasparyk (2005, p.126) em testemunhos extraídos indicaram para esta propriedade valores próximos e na ordem de 3 MPa. A pesquisadora observou que a maioria dos valores de resistência à tração se apresentava na faixa de cerca de 8 a 17% da resistência à compressão. Já em outros estudos envolvendo ensaios também com testemunhos de concreto deteriorados pela RAA, notaram-se valores mais baixos, na faixa de 5 a 10% da resistência à

compressão (HASPARYK et al., 2004, p.905), indicando provavelmente diferentes estágios em que se encontravam a reação.

### ➤ **Permeabilidade**

Existe uma correlação inversamente proporcional entre a propriedade de permeabilidade e a resistência à compressão através da porosidade capilar.

Com base nos resultados obtidos por Hasparyk (2005, p.128) constataram-se diferenças entre os concretos de jusante e de montante, onde se tem para os concretos mais deteriorados (jusante) menor permeabilidade em função, provavelmente, da colmatação dos poros a partir dos produtos da RAA formados e, conseqüente intensificação da resistência à compressão. No trabalho da pesquisadora são comparados os resultados de várias classes e é verificado que a classe não alterada pela RAA, apresenta em média uma permeabilidade superior.

## 2.4. MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO DA RAA

As investigações da deterioração, tanto por monitoramento no campo quanto por experimentos laboratoriais, podem auxiliar na adoção de algumas medidas corretivas, com o objetivo de minimizar os danos causados pelas expansões, apesar de não existir ainda uma maneira efetiva e econômica de interromper a evolução da RAA uma vez que o processo já tenha sido iniciado.

Segue abaixo, alguns métodos de investigação, experimental e analítico da reação álcali-agregado.

### 2.4.1. Experimental

#### 2.4.1.1. Laboratório

##### 2.4.1.1.1. Macroscópico

A seguir enumeram-se os principais métodos laboratoriais utilizados no auxílio e caracterização das reações álcali-agregado.

- ✓ Inspeção visual de testemunhos extraídos;

- ✓ Ensaio Químico – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 9774 (1987), American Society for Testing and Materials – C 289 (1994) e Norma Mercosul – NM 28 (1995);
- ✓ Ensaio Acelerado – American Society for Testing and Materials – C 1260 (2005) e American Society for Testing and Materials – C 1567 (2004); Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 15577: Agregados - Reatividade álcali-agregado – Partes 1, 2, 3, 4, 5 e 6.
- ✓ Ensaio “GEL-PAT”;
- ✓ Ensaio das Barras de Argamassa - Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 9773 (1987) e American Society for Testing and Materials – C 227 (1990);
- ✓ Ensaio do Cilindro de Rocha - Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 10340 (1988) e American Society for Testing and Materials – C 586 (1992);
- ✓ Ensaio do Prisma de Concreto – American Society for Testing and Materials – C 1293 (2001);
- ✓ Ensaio Térmico (Osipov);
- ✓ Ensaio em Autoclave;
- ✓ Ensaio CSA A – 23.2 – 26A – Método Químico Canadense;
- ✓ Ensaio CSA A 23.2 – 25A – Método Canadense das Barras;
- ✓ Determinação do Índice de Deterioração do Concreto.

E o mais novo conjunto de normas brasileiras elaborado pelo Comitê CB-18/ABNT:

- ✓ Ensaio ABNT NBR 15577 – 1: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.
- ✓ Ensaio ABNT NBR 15577 – 2: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto.
- ✓ Ensaio ABNT NBR 15577 – 3: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.
- ✓ Ensaio ABNT NBR 15577 – 4: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.

- ✓ Ensaio ABNT NBR 15577 – 5: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.
- ✓ Ensaio ABNT NBR 15577 – 6: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto.

#### 2.4.1.1.2. *Microscópico*

- **Análises petrográficas por meio da microscopia óptica**

A análise petrográfica é efetuada a partir do exame em microscópio óptico com a possibilidade de se efetuarem observações em luz transmitida e em luz refletida (polarizada). A microscopia óptica de luz transmitida permite informar as alterações sofridas no concreto quando em presença da RAA. Estas modificações dizem respeito às áreas entorno do agregado, ou seja, fissuras existentes, material de preenchimento das mesmas (produtos esbranquiçados ou bordas escuras). Permite ainda visualizar a situação da pasta, presença de poros e material de preenchimento dos mesmos (DAL MOLIN, 2007, p.427).

- **Microscopia eletrônica de varredura**

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica que permite a investigação de amostras através da produção de imagens com alta resolução.

O MEV tem seu potencial ainda mais desenvolvido com a adaptação de detectores de raios-X permitindo a realização de análise química da amostra em observação. Atualmente, quase todos os MEVs são equipados com detectores de energia dispersiva (EDX) (MALISKA, 2007, p.4).

Os sinais de maior interesse na microscopia eletrônica de varredura são: por elétrons retroespalhados, por elétrons secundários, por EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) e por microscopia eletrônica de varredura ambiental (MALISKA, 2007, p.4).

- **Espectroscopia de infravermelho**

A espectroscopia de infravermelho (IV) pode ser usada para identificar um composto, determinar a composição de misturas, monitorar reações e fornecer informações úteis para deduzir a estrutura molecular (DAL MOLIN, 2007, p.404).

### ▪ **Difratometria de raio X**

A difratometria de raio X é uma técnica que revela a estrutura cristalina das fases que compõem os materiais através das distâncias interatômicas, fazendo o uso dos raios X (DAL MOLIN, 2007, p.413).

Dentre as vantagens da técnica de difração de raio X para a caracterização de fases, destacam-se: a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados obtidos (pois o perfil de difração obtido é característico para cada fase cristalina), a possibilidade de análise de materiais compostos por uma mistura de fases e uma análise quantitativa dessas fases (DAL MOLIN, 2007, p.413).

Além das técnicas citadas acima existem também a espectroscopia de Absorção Atômica, a espectroscopia de ressonância nuclear magnética, a espectroscopia por fluorescência de raio X, a termogravimetria e análises térmicas diferenciais.

#### *2.4.1.2. Campo*

##### *2.4.1.2.1. Inspeções visuais*

Esta etapa tem como objetivo a verificação in loco de mudanças na integridade da barragem, permite conhecer as anomalias existentes na estrutura e observar de forma geral o seu estado de conservação. Em muitos casos, mudanças na integridade da barragem podem ser detectadas somente através de inspeções visuais, que desempenham uma importante variável de decisão, quer para reexame ou atualização do sistema de monitoramento (ORLOWSKI, E. A. G.; LACERDA, L. A.; YAMAUCHI, V., 2003, p.477).

##### *2.4.1.2.2. Contraste químico*

A técnica de contraste químico foi desenvolvida nos Estados Unidos para verificar a presença da reação em seus estágios iniciais ou em locais onde as inspeções visuais nada detectassem. Consiste de duas técnicas de contraste de imagens, ou colorimétricas, que buscam verificar a presença da RAA: a do acetato de uranila e a do cobaltonitrito de sódio.

A primeira é obtida através da visualização da imagem na presença de luz ultravioleta (UV), em que podem ser evidenciados os produtos da reação, pela alteração da cor do concreto para verde e amarelo de maneira fluorescente, como visualizado na Figura 20 (HASPARYK, 1999 apud GOULART et al. 1998).

A segunda técnica de contraste de imagens é mais confiável e ecológica que o método do acetato de uranila, trata-se do método das manchas, com aplicação de cobaltonitrito de sódio. Consiste em colocar alguns produtos químicos (soluções aquosas saturadas de cobaltonitrito de sódio e compostos de rodamina), em contato com a superfície de concreto que se deseja avaliar. Se o gel estiver presente ocorrerá uma reação com estes reagentes, que o colorem. O resultado pode ser visto em poucos minutos, sob luz natural (KUPERMAN; SALLES; PÍNFAARI; CARNEIRO, 2005).

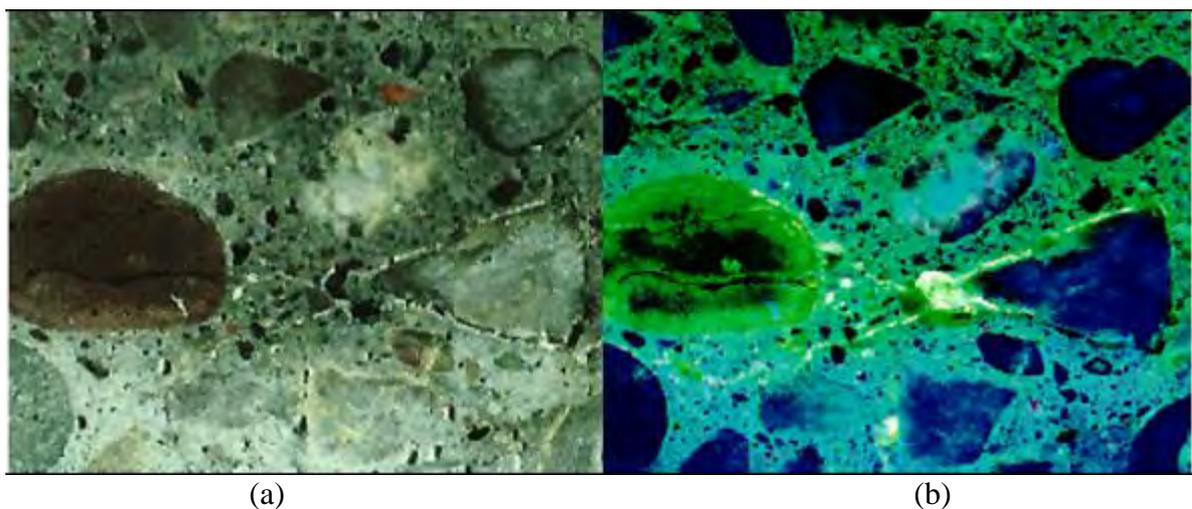


Figura 20 – (a) Fissuras no agregado graúdo devido à RAA; (b) Mesma visualização em campo – luz UV depois do tratamento com solução de acetato de uranila. A luz amarela-esverdejada depositada ao redor do agregado é o gel de RAA.

Fonte: Saouma e Yunping XI (2004, p.11)

#### 2.4.1.2.3. Instrumentação

Dentre todas as medições usualmente efetuadas em barragens de concreto, são os deslocamentos que dão indicações mais seguras e intuitivas, relativas a uma apreciação do comportamento global da estrutura (MENDES, 1962).

Para Mendes (1962), a medição desses deslocamentos pode ser feita: quer em relação a pontos do terreno, considerados fixos e afastados da obra (métodos geodésicos), quer em relação a pontos da própria estrutura ou da sua fundação (extensômetros múltiplos de hastes, medidores triortogonais, pêndulos diretos e invertidos, marcos de referência, etc).

Apresenta-se a seguir, alguns instrumentos usualmente instalados em barragens afetadas pela RAA.

- **Marcos de referência:** Permitem acompanhar os movimentos das estruturas através de nivelamentos de precisão, em relação a pontos considerados fixos nas ombreiras;

- **Extensômetros múltiplos de hastes:** Utilizados para medição de deslocamentos e deformações em maciços rochosos e em partes do concreto.

Segundo Bernardes (2000, p.84) os extensômetros de fundação ou extensômetros múltiplos de hastes, instalados nas galerias de drenagem das barragens, são importantes, dentre outros aspectos não menos relevantes, para a separação dos deslocamentos verticais medidos nas cotas superiores, das parcelas devidas a movimentos na fundação, os quais, em princípio, nada terão a ver com a expansão do concreto.

- **Medidores triortogonais de juntas:** Medição de deslocamentos em juntas e fissuras de estruturas de concreto, túneis, galerias e maciços rochosos. Consiste em duas peças de aço inox combinadas, dotadas de braços orientados em três direções ortogonais. Cada parte é fixada em um lado da junta ou fissura por meio de um gabarito. Para efetuar as leituras, utiliza-se um relógio comparador adaptado (LABORATÓRIO COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP DE ENGENHARIA CIVIL, 2006).

O medidor triortogonal possibilita a medição das três componentes dos deslocamentos diferenciadas entre blocos:

- Abertura e fechamento de junta;
  - Recalque diferencial e elevação entre blocos;
  - Deslizamento horizontal entre blocos (Avanço/Recuo).
- 
- **Pêndulos diretos:** Para medição de deslocamentos horizontais da crista da barragem. São instalados a partir de tubulação posicionada verticalmente na estrutura, durante o período construtivo (SILVEIRA, 2003, p.227).
  - **Pêndulos invertidos:** Para medição de deslocamentos cisalhantes da base da barragem. São instalados a partir de sondagens de grande diâmetro ou de poços de prospecção, fixando-se o fio de aço inox na parte mais profunda da sondagem/poço e mantendo-o tensionado verticalmente através de um flutuador toroidal, imerso em um tanque com óleo (SILVEIRA, 2003, p.230). Este sistema permite a livre movimentação do fio ao longo da horizontal.
  - **Instrumentação por fibra ótica:** A instrumentação por fibra ótica propicia a caracterização e o conhecimento das características monitoráveis do concreto da Barragem,

tais como: temperatura, deformação, deslocamentos, etc., de maneira mais abrangente e distribuída, do que os métodos tradicionais (MOSER, 2006, p.1).

- **Instrumentação geodésica:** A aplicação de técnicas geodésicas permite a determinação de deslocamentos absolutos da estrutura, normalmente conciliando diversas técnicas de posicionamento, tais como: nivelamento geométrico de precisão, trilateração, triangulação, posicionamento por técnicas espaciais (Global Positioning System – GPS) e poligonação, sendo que cada uma tem sua aplicação específica (ZOCOLOTTI FILHO, 2005, p.9).

## 2.4.2. Analítico

### 2.4.2.1. Modelos matemáticos

Existe um bom número de modelos que tentam representar a expansão causada pela RAA em barragens (Ulm, Coussy, Kefei, e Larive, (2000) – “Thermo-Chemo-Mechanics of ASR Expansion in Concrete Structures”; Li, e Coussy, (2002) – “Concrete ASR degradation: from material modeling to structure assessment; Larive, (1998) – “Apports Combinés de l’Experimentation et de la Modélisation à la Compréhension de l’Alcali-Réaction et de ses Effets Mécaniques”; Léger, Côté, e Tinawi, (1996) – “Finite Element Analyses of Concrete Swelling Due to Alkali-Aggregate Reactions in Dams”, dentre outros). A maioria dependente de dados do campo para simular devidamente as deformações em uma estrutura real.

Os tipos, a classificação, e as técnicas de análises dos modelos matemáticos não serão discutidos neste trabalho, visto não ser objetivo da pesquisa.

Atualmente, dispõe-se de uma diversidade de metodologia para investigação da RAA. Cabe ressaltar que a aplicação de apenas uma metodologia não é suficiente para delinear um eventual comportamento deletério da estrutura, sendo necessária uma avaliação conjunta e criteriosa dos resultados obtidos através de várias metodologias para obter respostas mais seguras do comportamento da estrutura, frente a essa patologia.

### 3. A USINA HIDRELÉTRICA DE JAGUARI – SP

A Usina Hidrelétrica Jaguari entrou em funcionamento em 1973 e está localizada no Rio Jaguari, entre os municípios de Jacareí e São José dos Campos (SP). O acesso à hidrelétrica é feito pela Rodovia Presidente Dutra, km 165.



Figura 21 – Usina Hidrelétrica Jaguari  
 Fonte: Usina Hidrelétrica de Jaguari (2006)



Figura 22 – Distribuição geográfica das usinas hidrelétricas da CESP  
 Fonte: Companhia Energética de São Paulo – CESP (2006)

Sua potência instalada é de 27,6 MW, distribuídas por duas unidades geradoras com turbinas tipo Francis. O reservatório possui 56 km<sup>2</sup> de extensão e sua principal finalidade é permitir o controle da vazão do Rio Paraíba do Sul, que é o fornecedor de água de várias cidades, tanto do Vale do Paraíba, no Estado de São Paulo, quanto do Estado do Rio de Janeiro.

A Casa de força da UHE Jaguari é do tipo abrigado, com comprimento total de 34 m, cota da crista igual a 634,88 m e cota do piso dos geradores igual a 561,5 m (USINA HIDRELÉTRICA DE JAGUARI, 2006).

A projetista da UHE Jaguari foi a Hidroservice e a execução da obra ficou a cargo da construtora Camargo Correa. A ficha técnica resumida da Usina Hidrelétrica de Jaguari está apresentada na Tabela 3.

Os aproveitamentos Hidrelétricos de Paraibuna e de Jaguari se localizam no Alto Rio Paraíba, no Estado de São Paulo, e foram construídos com finalidade múltipla de regularização, irrigação e geração de energia elétrica.

A UHE Jaguari está construída sobre um maciço de origem pré-cambriana, em que predominam os granitos e gnaisses dentre os tipos litológicos mais frequentes (SILVEIRA, 2003, p.77).

No final do ano 2000 foram feitas investigações na barragem e levantou-se a possibilidade de que o concreto da Tomada d'água estivesse afetado pela reação álcali-agregado. Estudo aprofundado foi realizado em 2004, concluindo-se que a TA estava realmente severamente afetado pela reação. Logo, é de suma importância o conhecimento da real situação da UHE Jaguari, no tocante à RAA, para garantir a operacionalidade da usina e a continuidade da geração de energia.

O monitoramento da Tomada d'água da UHE Jaguari possibilitará a adoção de medidas corretivas, caso as expansões verificadas sejam significativas, indicando movimentações indesejáveis nas interfaces entre estruturas civis e equipamentos eletromecânicos. A Figura 23 mostra a estrutura da TA na época de sua construção e a Figura 24 a vista aérea atual da Hidrelétrica.

Como consequência que a eventual intensificação da RAA poderá provocar será a de restringir ou mesmo impedir a descarga d'água mínima à jusante, comprometendo o abastecimento de água para o Vale do Paraíba e do Estado do Rio de Janeiro (há uma descarga mínima obrigatória), de natureza imensurável e extremamente grave.



Figura 23 – Estrutura da Tomada d'água no período de construção



Figura 24 – Vista aérea atual da UHE Jaguarí  
Fonte: Google Maps (2008)

Tabela 3 – Ficha técnica da UHE Jaguari  
 Fonte: Usina Hidrelétrica de Jaguari (2006)

<b>Ficha Técnica da UHE Jaguari</b>	
Área da bacia hidrográfica	1.300 km <sup>2</sup>
Área do espelho d'água (N.A. 623,00 m)	56 km <sup>2</sup>
Volume morto	443 x 106m <sup>3</sup>
Volume útil	793 x 106m <sup>3</sup>
Volume reservado para cheia de projeto	163 x 106m <sup>3</sup>
Comprimento no coroamento	623,00 m
N.A. máximo maximorum	625,80 m
N.A. máximo útil	623,00 m
N.A. mínimo útil	603,20 m
Vazão média a longo termo (MLT 1931 - 1998)	29 m <sup>3</sup> /s
Vazão máxima média diária observada (30/05/83)	213 m <sup>3</sup> /s
N.A. máximo maximorum	562,40 m
N.A. máximo	557,90 m
N.A. mínimo	555,80 m
Vazão máxima dos vertedores (vertedores + válvulas)	410 m <sup>3</sup> /s
Vazão turbinada nominal total	50 m <sup>3</sup> /s
Tipo	Francis eixo vertical
Turbinas	2
Potência nominal unitária	12.364 kW
Queda de referência	49,90 m
Engolimento máximo	25 m <sup>3</sup> /s
Tipo	Síncrono
Potência nominal unitária	12.364 kW
Queda de referência	49,90 m
Engolimento máximo	25 m <sup>3</sup> /s
Tipo	Síncrono

### 3.1. OBSERVAÇÕES DA INSTRUMENTAÇÃO NA LAJE DA TA

Após a descoberta da reação álcali-agregado no final de 2000 na UHE de Jaguari, foram instalados 07 medidores triortogonais (MT) para monitoramento das evoluções das fissuras a partir do movimento de aberturas das juntas. Destes sete MT, três se localizam na cota 627,50 m da Tomada d'água, dois na Casa de Força – Jusante e dois na Casa de Força – Montante. Anteriormente à instalação dos MT, a CESP havia instalado placas de vidro em algumas fissuras com o intuito de avaliar se as mesmas estavam ativas, o que acabou sendo confirmado. A Figura 25 mostra detalhes do MT e da placa de vidro instalados na UHE Jaguari com a finalidade de mensurar movimentações de algumas fissuras.



Figura 25 – (a) Detalhe do MT – 03; (b) Detalhe da fissura na TA e da placa de vidro

Fonte: Themag (2000)

Nestes medidores foram notadas variações significativas, principalmente no movimento de aberturas das fissuras indicando evolução da reação álcali-agregado existente nestas estruturas, como podem ser visualizadas nas Figuras 27, 28 e 29.

A Figura 26 apresenta o esquema da localização e posicionamento dos Medidores Triortogonais instalados na laje da TA. Analisando a figura é possível estabelecer a comparação de deslocamento dos três instrumentos de uma forma conjunta.

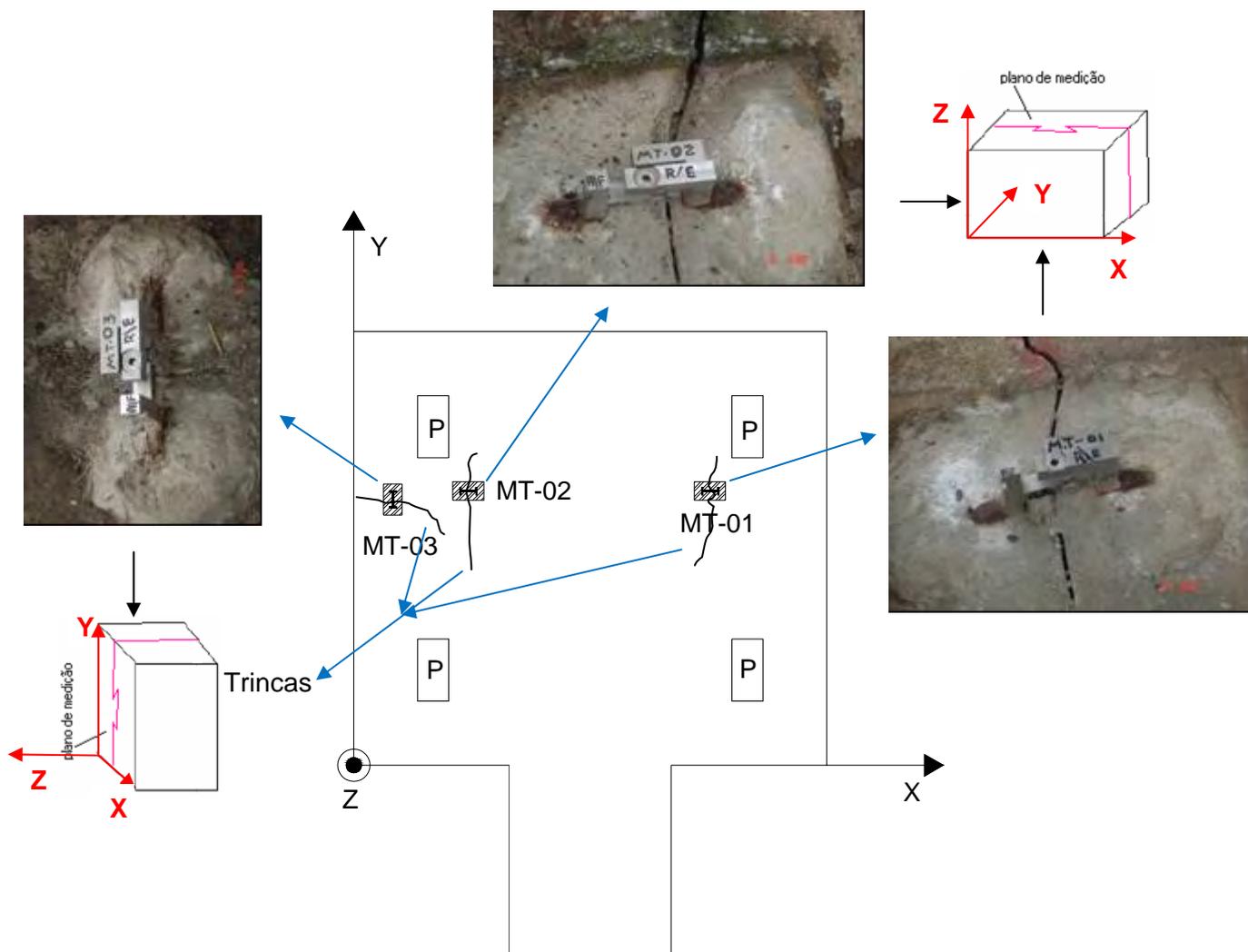


Figura 26 – Esquema da localização e posicionamento dos MT instalados na Laje da TA

O Quadro 3 mostra as componentes analisadas em cada eixo de referência dos Medidores Triortogonais.

Quadro 3 – Componente em cada eixo de referência dos medidores triortogonais

	X	Y	Z
MT – 01	A/F	A/R	R/E
MT – 02	A/F	A/R	R/E
MT – 03	A/R	A/F	R/E

Sendo:           A/F – Abertura e Fechamento;  
                   A/R – Avanço e Recuo; e  
                   R/E – Recalque e Elevação

As Figuras 27 a 29 apresentam as leituras dos três MT instalados na laje da TA no período de 01/01/2000 a 28/10/2008.

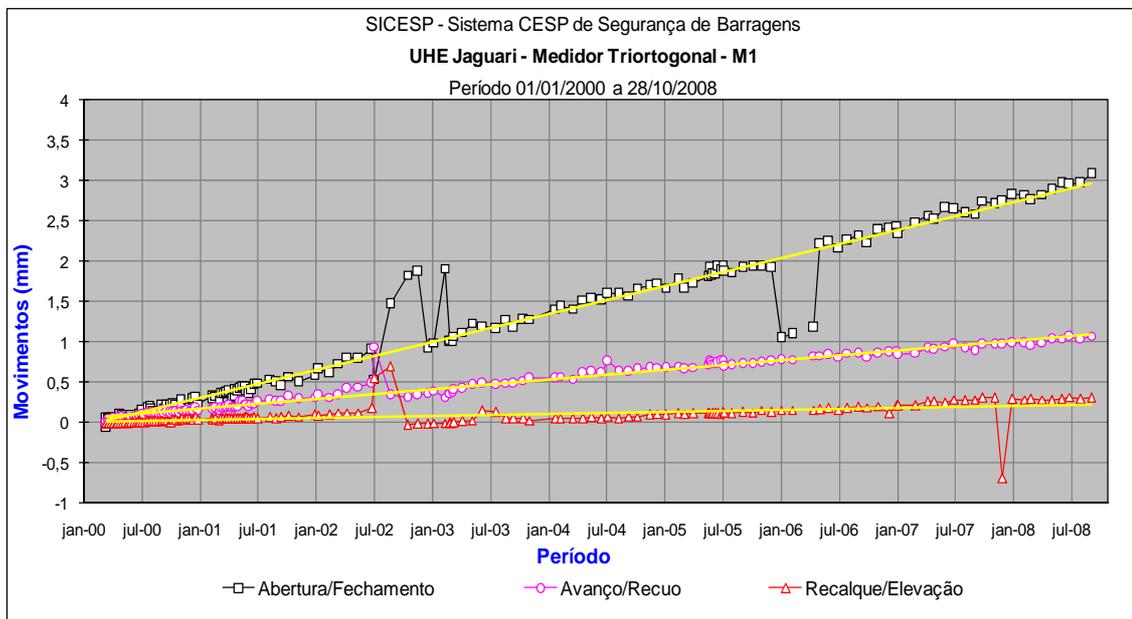


Figura 27 – Medidor triortogonal 1 (MT1) instalado na laje da TA

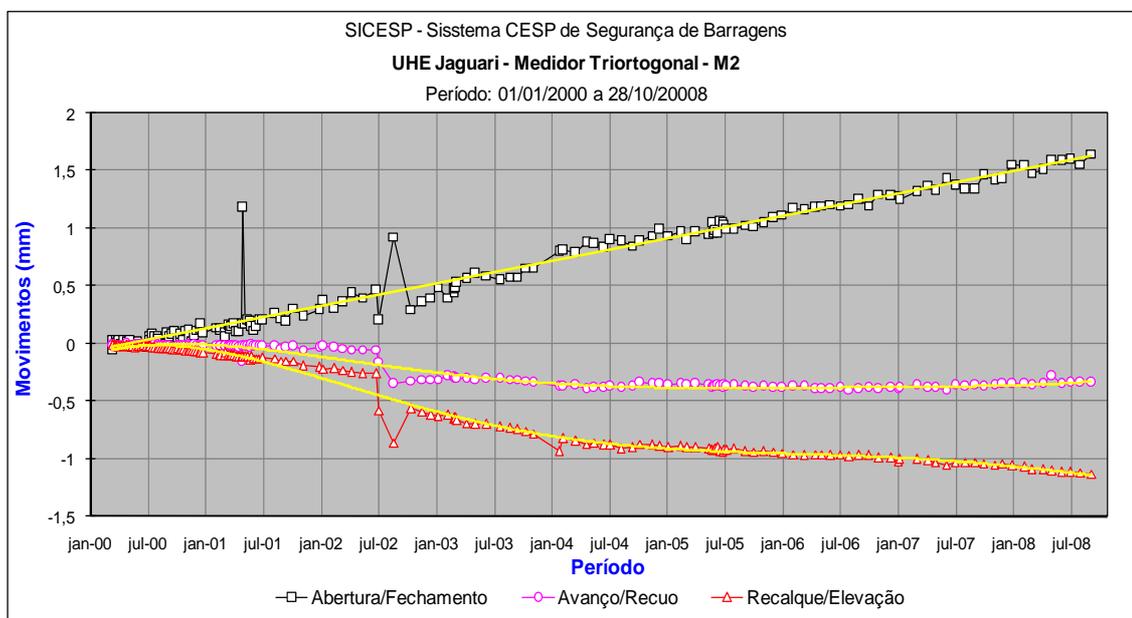


Figura 28 – Medidor triortogonal 2 (MT2) instalado na laje da TA

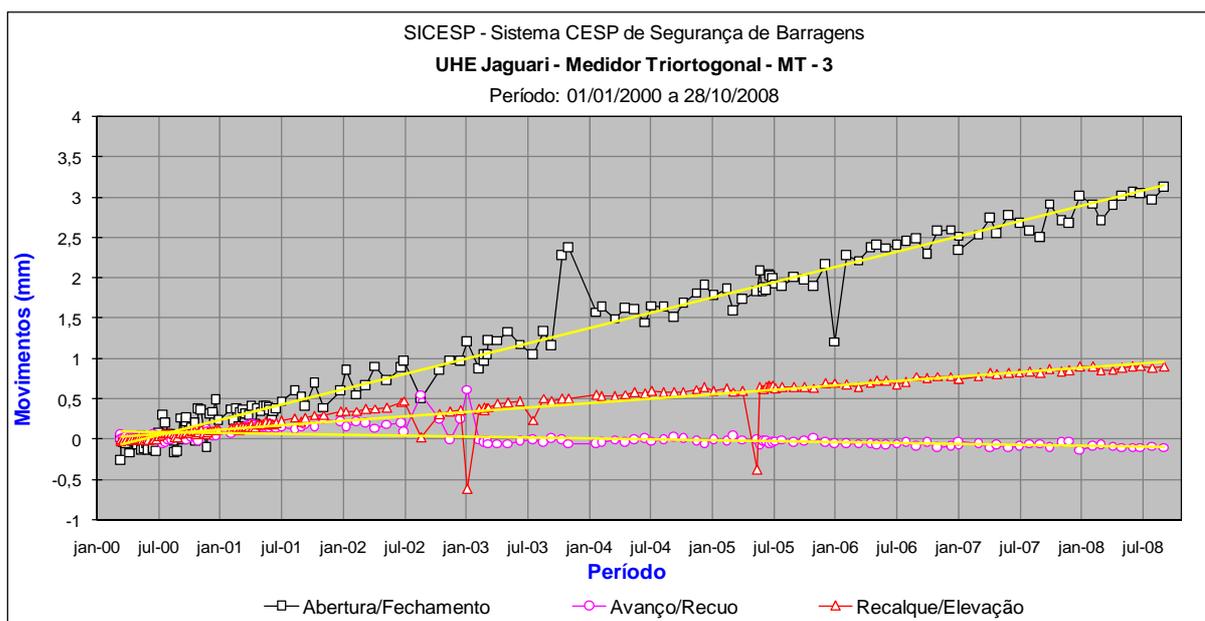


Figura 29 – Medidor triortogonal 3 (MT3) instalado na laje da TA

Os três medidores triortogonais (MT) instalados nas fissuras da laje da Tomada d'água revelaram variações significativas durante o período analisado, principalmente na componente de deslocamento “Abertura/Fechamento”, cujo comportamento gráfico é crescente para os três MT.

Merece destaque, entretanto, o comportamento das fissuras medidas pelo MT 1 e MT 3 da componente acima supracitada, revelando aberturas próximas a 3,2 mm durante os oito anos de observação.

A componente avanço/recuo não mostrou variações para o MT 3. Já para o MT 2, nota-se um recuo próximo a 0,5 mm e para o MT 1 avanço próximo a 0,5 mm para o mesmo período analisado.

Quando se analisa os deslocamentos referentes a recalque/elevação percebe-se para o MT 1 um comportamento quase constante. Para o MT 2 tem-se um comportamento decrescente chegando a valores de recalque de 1,13 mm. Comportamento oposto foi observado para o MT 3, com valores crescentes de elevação próximos a 1 mm.

Entende-se necessário e oportuno um programa de monitoramento das estruturas-problema, com a instalação de instrumentos na Tomada d'água da UHE Jaguari e acompanhamento de suas indicações. Neste caso, a instalação de instrumentos fornece indicações sobre as taxas de expansão da estrutura e, com isso, indica qual a ocasião mais propícia para alguma intervenção que impeça o travamento das comportas-ensecadeiras.

Portanto, para poder monitorar essa estrutura de forma mais abrangente foram instalados mais sete medidores triortogonais, distribuídos no piso (laje da TA), nos pilares do pórtico, no pilar da grade e na câmara do servomotor, assim como 24 Bases de Tensotast instaladas nas mesmas localizações. Está prevista também a instalação de extensômetros de haste, pêndulos invertidos e um aparato de medição com laser e LVDT para completar a instrumentação instalada na Tomada d'água da UHE Jaguari.

#### **4. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O desenvolvimento do projeto contou com toda a estrutura do Laboratório CESP de Engenharia Civil – LCEC da Companhia Energética do Estado de São Paulo, com o Departamento de Física e Química (DFQ) da Unesp de Ilha Solteira, com a colaboração da ABCP, da Desek Engenharia e com outros laboratórios, quando necessário.

Neste capítulo será apresentada a inspeção visual feita na barragem, os procedimentos para preparação dos corpos-de-prova extraídos, os ensaios realizados nos testemunhos e a confecção do concreto com o agregado proveniente da região a partir da reconstituição do traço, bem como os ensaios realizados nos agregados coletados da região, para análise das expansões devidas à RAA.

A Figura 30 apresenta um organograma das atividades do programa experimental realizado.

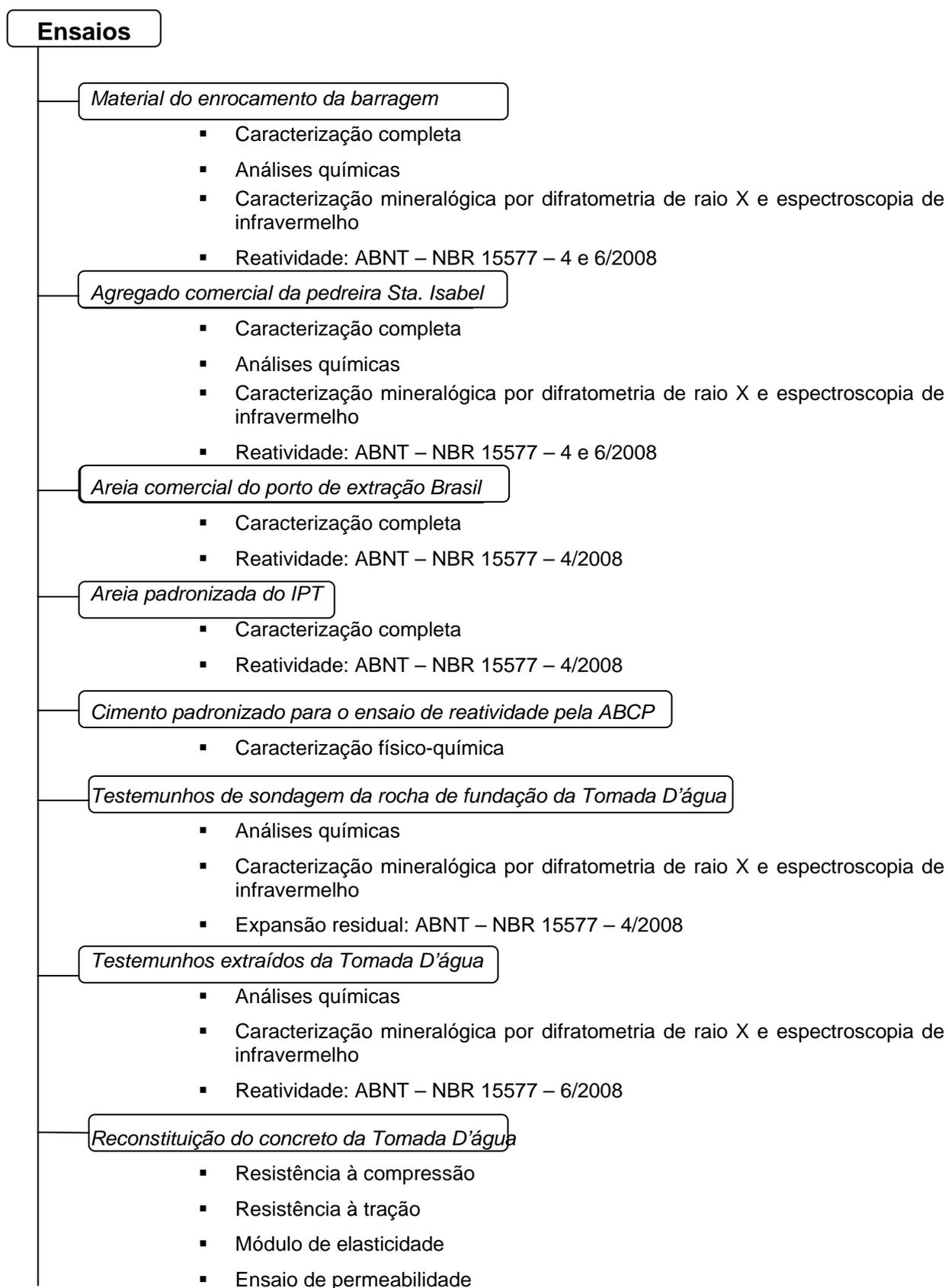


Figura 30 – Organograma de atividades

#### 4.1. MATERIAIS EMPREGADOS

Com objetivo de avaliar o desempenho reativo dos agregados foram realizados ensaios com materiais de três tipos de procedências: agregado coletado do enrocamento da barragem, agregado coletado de uma pedreira comercial próxima a localização da usina e testemunhos de sondagem da rocha de fundação.

##### ➤ **Material procedente do enrocamento da UHE Jaguari**

O Material procedente da UHE Jaguari foi coletado do enrocamento da barragem, por se acreditar que trata de material do mesmo tipo que o utilizado na época da construção da usina. A Figura 31 ilustra o local onde foi coletado o material.



Figura 31 – Local de coleta do agregado

##### ➤ **Material procedente da pedreira comercial Sta. Isabel**

O agregado da Pedreira Sta. Isabel foi escolhido para confeccionar o concreto, por se tratar de material com mesma formação litológica e por se encontrar na mesma região da usina. A Figura 32 ilustra o material procedente da Pedreira.



Figura 32 – Agregado comercial procedente da pedreira Sta. Isabel

➤ **Areia comercial do porto Extração Brasil**

A areia comercial do Porto de extração Brasil foi escolhida para confeccionar o concreto, por se tratar de material com mesma formação litológica e por se encontrar na mesma região da usina.

➤ **Areia padrão IPT**

A areia padrão, fornecida pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo – IPT foi utilizada para a confecção dos prismas de concreto no ensaio de reatividade prescrito pela ABNT – NBR 15577 – 4/2008.

➤ **Cimento fabricado pela ABCP**

O cimento utilizado na composição da argamassa para o ensaio de reatividade segundo a NBR 15577 – 4/2008 e para o ensaio em prismas de concreto NBR 15577 – 6/2008 foi o caracterizado e comercializado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. Suas características físicas e químicas satisfazem os requisitos da ABNT NBR 5732 e ou ABNT NBR 5733, além de possuir finura de  $(4900 \pm 200)$   $\text{cm}^2/\text{g}$  determinada de acordo com a NBR NM 76, equivalente alcalino total expresso em  $\text{Na}^2\text{O}_{\text{eq}}$  ( $0,658\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ) de  $(0,90 \pm 0,10)\%$ , determinado de acordo com a NBR NM17 e expansão em autoclave inferior a 0,20%, determinada pelo método prescrito pela ASTM C 151.

➤ **Testemunhos de sondagem da rocha de fundação da Tomada d'água**

Outros materiais coletado da UHE Jaguari foram testemunhos retirados da rocha de fundação da Tomada d'água. Estudou-se esse material por meio do ensaio de reatividade descrito pela NBR 15577 – 4/2008, comparando o resultado obtido com os dos agregados coletados do enrocamento e da pedreira comercial.



Figura 33 – Testemunhos de sondagem da rocha de fundação da TA da UHE Jaguari

### ➤ Testemunhos extraídos da Tomada d'água da UHE Jaguari

Foram extraídos testemunhos da Tomada d'água para avaliar as características expansivas do concreto dessa estrutura causadas pela RAA.

## 4.2. METODOLOGIA APLICADA AOS TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS

### 4.2.1. Inspeção da Barragem “in loco” e Extração dos Testemunhos

A Figura 34 ilustra a ocorrência de fissuras aleatórias existentes na laje da Tomada D'Água. A Figura 35 apresenta as anomalias tomando toda a parte externa da estrutura e a Figura 36 mostra a vista geral da TA.



Fissuração tipo mapa na laje da Tomada d'água



Detalhe da fissura preenchida com material branco<sup>1</sup>



Detalhe do preenchimento da fissura com material branco exsudado



Fissuras na laje da TA alcançando 10 mm.

Figura 34 – Fissuras presentes na laje da TA e suas características

---

<sup>1</sup>Material braço – Pode ser gel de reação álcali-agregado. O gel de RAA pode apresentar-se com aspecto fluido (gelatinoso) ou cristalizado (de aspecto porcelânico, gretado – denominado xero-gel).



Vista lateral esquerda – Fotografia de dezembro/2007



Vista frontal – Fotografia de dezembro/2007



Detalhe da vista frontal – Fotografia de dezembro/2007



Detalhe da vista lateral direita – Fotografia de dezembro/2007

Figura 35 – Ocorrência de fissuras aleatórias na parte externa da TA



Figura 36 – Vista geral da Tomada d'água – Fotografia de dezembro/2007

A porção emersa da Tomada d'água, única possível de ser inspecionada, apresenta intensa fissuração de característica aleatória e grande parte dessas fissuras está com aberturas na casa de milímetros. Os pilares do pórtico de carga, por exemplo, apresentam fissuras longitudinais nas quatro faces. Segundo informações obtidas com os técnicos da Usina, a taxa de progressão da abertura de algumas fissuras auscultadas tem sido da ordem de 0,5 mm/ano, desde que seu acompanhamento passou a ser efetuado (CESP – RELATÓRIO, 2000, p.31).

De acordo com Alves et al. (1997), uma das formas de prevenir a RAA é através de ensaios de laboratório com os materiais a serem utilizados no concreto, porém, quando uma estrutura apresenta RAA é necessária uma inspeção “in situ” e a extração de testemunhos de concreto para ensaios laboratoriais.

Foi realizada uma visita à barragem da UHE Jaguari para a extração dos testemunhos no concreto da laje da TA, no pilar do pórtico de carga da TA e no pilar à jusante da casa de força. A Figura 37 ilustra os procedimentos executados.



Marcação do local de extração do concreto – face superior do pilar a jusante da casa de força.



Instalação do equipamento de extração na laje da TA



Instalação do equipamento de extração no pilar do pórtico de carga da Tomada d'água



Testemunho extraído.

Figura 37 – Procedimento para extração dos testemunhos

#### 4.2.2. Preparação dos testemunhos

Os testemunhos foram preparados logo após a sua extração para realização dos ensaios em laboratório. Primeiramente, o testemunho foi seco superficialmente, pois a extratora utiliza água no processo de perfuração deixando umidade na superfície do concreto. Em seguida, foi identificado com caneta, embalado com filme plástico para não perder a umidade interior e, então, acondicionado no recipiente de transporte da Usina até o laboratório.

A etapa seguinte à retirada dos corpos-de-prova de concreto foi o preenchimento do furo com *graute*. O material foi lançado no furo, o que permitiu o perfeito fechamento do orifício, finalizando assim a operação.

Com a chegada dos corpos-de-prova extraídos da barragem, deu-se início à preparação para realizar os ensaios de laboratório. Os testemunhos foram separados e identificados conforme o furo de sondagem, visualizados na Figura 38.

Depois de identificados, os corpos de prova foram cortados em serra de disco com 18 cm de comprimento (7,5 cm de diâmetro), conforme Figura 39. Depois de serrados, os corpos-de-prova necessitaram de retificação para tornar as superfícies serradas planas e paralelas (Figura 40).

Após este processo de retificação, os corpos-de-prova já se encontravam preparados para os ensaios (Figura 41).



Figura 38 – Identificação das amostras de acordo com o local de extração.



Figura 39 – Corte dos testemunhos em serra de disco



Figura 40 – Retificação das superfícies dos testemunhos



Figura 41 – Testemunhos preparados para os ensaios

Além dos testemunhos extraídos da laje da Tomada d'água da UHE, também foi objeto de estudo um concreto reconstituído em laboratório para a análise de suas propriedades. Para a reconstituição do traço do concreto foram empregados agregados miúdos e graúdos de mesma procedência que os utilizados na construção da usina, bem como cimento com características físico-químicas provavelmente semelhantes.

#### 4.2.3. Inspeção visual dos testemunhos extraídos

Todos os testemunhos extraídos foram submetidos a uma inspeção visual, em laboratório, mais rigorosa e detalhada.

As amostras foram inspecionadas individualmente a olho nu e através de lupa com o objetivo de registrar as características presentes, relativas à RAA, tais como: poro contendo material em seu interior; fissuras (tanto na argamassa quanto nos agregados); bordas de reação; manchas escuras na argamassa ou em torno dos agregados; descolamentos entre o agregado e a pasta.

#### 4.2.4. Ensaio de expansão residual nos testemunhos

O ensaio com os testemunhos extraídos seguiu o mesmo procedimento aplicado na avaliação do agregado (ABNT – NBR 15577 – 6). Os testemunhos foram serrados de forma a se obter comprimento aproximado de 180 mm, pois na extração das amostras, houve quebra de alguns corpos-de-prova.

Na preparação dos testemunhos foram introduzidos pinos de aço inox em suas extremidades (os mesmos pinos utilizados na moldagem de prismas de concreto pela NBR 15577 – 6) de forma que estes ficassem centralizados.

Os testemunhos foram perfurados e os pinos colados com adesivo epóxi fazendo com que seu comprimento efetivo fosse de  $180 \pm 2$  mm, como visualizados nas Figuras 42 e 43.



Figura 42 – Perfuração dos testemunhos no torno para fixação dos pinos



Figura 43 – Pinos colados com adesivo epóxi nas duas extremidades dos testemunhos



Figura 44 – Testemunhos nos suportes do ensaio de reatividade



Figura 45 – Suporte e base de leituras adaptados para realização do ensaio de reatividade

As leituras foram realizadas nas idades de 7, 28 e 56 dias, bem como a 3, 6, 9 e 12 meses. Antes de cada leitura, os testemunhos foram retirados da câmara de armazenamento à  $40^{\circ}\text{C}$  e depositados em uma sala com temperatura de  $23 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$  por  $16 \pm 4$  hs. As Figuras 46 e 47 mostram o armazenamento dos testemunhos nos baldes preparados para o ensaio e suas leituras de expansão, respectivamente.



Figura 46 – Armazenamento dos CPs nos baldes preparados para o ensaio



Figura 47 – Leitura das expansões no relógio comparador

#### 4.2.5. Análise Petrográfica e mineralógica

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) realizou ensaios em testemunhos extraídos da laje da TA (amostra: Laj) por meio de análise petrográfica, para identificar minerais potencialmente reativos. As técnicas utilizadas foram: observações macroscópicas e microscópicas através de microscopia estereoscópica (luz refletida) e microscopia óptica (luz transmitida) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2009, p.1-30).

As amostras dos testemunhos foram confeccionadas em lâminas delgadas, com aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  de espessura, para serem observadas por meio do microscópio óptico de luz transmitida. A investigação teve como objetivo determinar a existência da RAA, através da ocorrência de bordas de reação nos agregados, **gel contido nos poros** e microfissuras causadas pela expansão do gel.

Realizou também, observações microscópicas através da microscopia estereoscópica de luz refletida no Laboratório CESP de Engenharia Civil em fragmentos de testemunhos extraídos da Laje da Tomada d'água, a fim de visualizar a presença de gel da RAA.

As técnicas analíticas, como a espectroscopia de infravermelho e a difração de raio X, foram usadas para caracterizar a textura e forma cristalina da sílica nas partículas dos agregados e concretos. Esses ensaios foram realizados no Departamento de Física e Química (DFQ) da Unesp, campus de Ilha Solteira.

Para a espectroscopia de infravermelho e a difração de raio X, os materiais (testemunhos e agregados) foram fragmentados, sendo selecionadas as suas porções internas.

Estes fragmentos foram moídos através de almofariz/pistilo de ágata, sendo o pó resultante da moagem passante na peneira de abertura 38  $\mu\text{m}$ .

Para realização das análises por difratometria de raio X foi utilizado o método do pó, com lâminas vazadas de alumínio.

Na análise por espectroscopia no infravermelho as amostras previamente preparadas (cerca de 1mg) foram maceradas conjuntamente com brometo de potássio (KBr) seco de forma a constituir amostra suficiente para análise, material este que não interfere na absorção da amostra no infravermelho (IR). Em seguida, todo o material foi transferido para um pastilhador e compactadas a uma carga de 2 toneladas, para a obtenção de uma pastilha transparente com 13mm de diâmetro.

#### 4.3. METODOLOGIA APLICADA AO CONCRETO RECONSTITUÍDO

##### 4.3.1. Materiais

A usina estudada foi construída no final da década de 1960 e início da década de 1970, havendo poucas informações sobre as dosagens e propriedades dos concretos utilizados na sua construção. Foram encontrados registros quanto à resistência de projeto, dimensão máxima do agregado graúdo e trabalhabilidade dos concretos de algumas estruturas dessa obra, segundo informações constantes em relatório da Hidroservice (1967), mas não especificamente da estrutura da Tomada d'água (TA).

##### **Agregados**

O agregado utilizado na reconstituição do traço de concreto foi procedente da pedreira comercial Sta. Isabel, próxima à usina. As análises petrográficas realizadas nos agregados miúdos e graúdos retirado de testemunhos extraídos, 35 anos após o término da construção da usina, detectaram a presença de quartzo deformado e feldspato como sendo os principais minerais reativos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2009).

Como agregado miúdo, utilizou-se areia natural quartzosa proveniente da Pedreira comercial Extração Brasil, localizada próxima à barragem.

##### **Cimento**

Não há registros das características físicas e químicas dos cimentos utilizados na usina, porém existem informações obtidas por meio de conversas com técnicos que trabalharam na época da construção da barragem que o cimento utilizado na estrutura da TA

foi o CP-350 Votoran, ou seja, cimento Portland cuja resistência mínima à compressão aos 28 dias de idade era de 35 MPa.

Scanduzzi e Andriolo, (1986, p.197) mostram uma série de resultados de ensaios físicos e químicos de cimentos empregados em obras de barragens brasileiras. Os autores relatam que dos cimentos produzidos, de 75% a 80%, eram transportado em sacos e o restante a granel. A Tabela 4 mostra um resumo dos cimentos mais utilizados em diversas grandes obras do país (barragens), totalizando um volume de concreto de aproximadamente 38.000.000 m<sup>3</sup>. Dos resultados obtidos pode-se observar que os principais componentes se mantiveram nos seguintes intervalos:

Tabela 4 – Resumo das análises químicas dos cimentos utilizados nas barragens brasileiras

Fonte: SCANDIUZZI E ANDRIOLO (1986, p.199).

Compostos	Varição
C <sub>3</sub> S	35 a 59 %
C <sub>2</sub> S	14 a 35 %
C <sub>3</sub> A	6 a 12 %
C <sub>4</sub> AF	7 a 12 %
CaO	50 a 65%
SiO <sub>2</sub>	15 a 23 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 a 10 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5 a 3,8 %
MgO	1 a 6 %
Na <sub>2</sub> O	0,04 a 0,91 %
K <sub>2</sub> O	0,03 a 0,86 %
SO <sub>3</sub>	1,15 a 2,82 %

Apesar das tentativas efetuadas, não foi possível a obtenção de informações sobre as características físico-químicas dos cimentos utilizados na fabricação do concreto da TA junto aos fabricantes de cimentos da época. Portanto, optou-se por reproduzir o concreto com um cimento comercial do tipo CP II F – 32, por ser o mais próximo das características mencionadas pelos técnicos e por se enquadrar na faixa mencionada por Scanduzzi e Andriolo (1986, p.199). Na Tabela 5 estão apresentadas as análises físico-químicas do cimento empregado na reconstituição do traço do concreto.

Tabela 5 – Análise físico-química do cimento empregado na reconstituição do traço de concreto.

 					
Laboratório CESP de Engenharia Civil					
Referência		23128	Especificações		
Amostra		136M	NBR 11578		
Carta		096			
Data da coleta		01 a 30.06.2008	mín.	máx.	
Finura Peneira 200 (% retida)		1,41	-	12,0	
Finura Peneira 325 (% retida)		9,19	-	-	
Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		3325	2600	-	
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )		1,14	-	-	
Densidade absoluta (g/cm <sup>3</sup> )		3,06	-	-	
Água de consistência da pasta		gramas	133	-	-
		(%)	26,6	-	-
Início de pega (h:min)		02:53	01:00	-	
Fim de pega (h:min)		05:33	-	10:00	
Expansão em autoclave (%)		0,038	-	0,8 *	
Resistência à Compressão Axial	Consistência da argamassa	gramas	150	-	-
		a / c	0,48	-	-
	Data de moldagem		29.07.2008	-	-
	Tensão (MPa)	03 dias	26,0	10,0	-
		07 dias	26,8	20,0	-
28 dias		32,8	32,0	-	
Análise Química (%)	Perda ao fogo		5,96	-	6,5
	Insolúveis		0,34	-	2,5
	SiO <sub>2</sub>		18,96	-	-
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,94	-	-
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		4,76	-	-
	CaO		62,56	-	-
	MgO		1,92	-	6,5
	SO <sub>3</sub>		2,31	-	4,0
	Na <sub>2</sub> O		0,22	-	-
	K <sub>2</sub> O		1,04	-	-
	Equivalente alcalino Na <sub>2</sub> O		0,91	-	-
	Cal livre em CaO		2,70	-	-
Análise físico-química de cimento Cauê CP II-F-32					

## Dosagens

Sobre as dosagens, os únicos registros encontrados foram relativos a um relatório da Hidroservice (1967) contendo a consistência plástica, o diâmetro máximo do agregado e a resistência de projeto para a obra do Vertedouro, Canal do Vertedouro e Bacia de Dissipação.

Como não foram encontrados registros das dosagens dos concretos da Tomada d'água da usina de Jaguari, a maneira mais viável de se conseguir obter a dosagem do concreto foi através da reconstituição do traço.

A reconstituição foi feita no Laboratório CESP de Engenharia Civil – LCEC, utilizando uma adaptação da metodologia prescrita pelo Boletim nº 25 do IPT.

Sabe-se, a partir de conversas com trabalhadores da época que os cimentos utilizados não continham adição e que também não foi utilizado nenhum tipo de adição nas dosagens dos concretos.

#### **4.3.2. Método IPT de reconstituição de traço de argamassas – adaptado para concreto**

O método de reconstituição de traço desenvolvido originalmente no IPT para argamassas foi adaptado para concretos no Laboratório CESP de Engenharia Civil.

Esse método prevê as determinações quantitativas do agregado na forma de resíduo insolúvel (RI) e dos aglomerantes na forma de seus íons principais, cujos resultados são expressos na forma dos óxidos: anidrido silícico ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e óxidos de ferro e alumínio ( $\text{R}_2\text{O}_3$ ). Na fração volátil determina-se a umidade (UM) e perda ao fogo (PF) (VALDECIR; CINCOTTO, 2008).

A amostra separada por quarteamento foi moída até granulometria inferior a 0,84mm (# ABNT nº 20) e separada em amostras analíticas para os diferentes ensaios químicos:

- Determinação do RI;
- Determinação  $\text{SiO}_2$ ;
- Determinação da Umidade e Perda ao Fogo.

##### 1) Amostras:

Duas amostras de testemunho de concreto extraído da laje da TA – T1 e T2.

##### 2) Cálculo dos constituintes

Com base nos dados da análise química calcula-se a proporção aglomerante/agregado, isto é, o traço da argamassa em massa, que poderá ser convertido em volume a partir das massas unitárias dos materiais empregados.

O roteiro de cálculo a ser adotado depende do conhecimento da composição dos materiais empregados. Quando não se dispõe da composição química destes, torna-se necessário assumir valores médios de composição química de amostras de referência.

Os resultados da análise química são recalculados na base de material não volátil, isto é, excluindo o valor da perda ao fogo até 1000°C, ou seja, água livre e água combinada dos materiais empregados ou incorporados à argamassa na evolução do processo de endurecimento. Justifica-se este artifício de cálculo para permitir a obtenção dos teores de materiais originalmente utilizados na confecção da argamassa: os anidros e não carbonatados (VALDECIR; CINCOTTO, 2008).

Com os valores na base não volátil (NV) e admitindo-se o teor de resíduo insolúvel como sendo a fração agregado (areia), e os óxidos restantes solubilizados como sendo a fração aglomerante (cimento), são calculadas as respectivas proporções percentuais, em referência aos materiais empregados, bem como o traço. Para calcular os constituintes da argamassa, tem-se o seguinte procedimento:

*a) teor de agregado:* é o teor de resíduo insolúvel da argamassa ou concreto expresso na base não volátil ( $\%RI_{(ARG,NV)}$ ).

*b) teor de cimento:* primeiramente é calculado na base não volátil ( $\%Cim_{(ARG,NV)}$ ), a partir da sílica solúvel da argamassa ou concreto ( $\%SiO_{2(AVG,NV)}$ ) e da sílica solúvel do cimento empregado ( $\%SiO_{2(CIM,NV)}$ ):

$$\%Cim_{(ARG,NV)} = \frac{(\%SiO_{2(AVG,NV)} \cdot 100)}{(\%SiO_{2(CIM,NV)})} \quad (1)$$

Para se obter o teor de cimento originalmente dosado ( $\%Cim_{(ARG,OR)}$ ), corrige-se o calculado na base não volátil, acrescentando a perda ao fogo do cimento empregado ( $\%PF_{(CIM)}$ ), através da seguinte equação:

$$\%Cim_{(ARG,OR)} = \frac{(\%Cim_{(ARG,NV)} \cdot 100)}{(100 - \%PF_{(CIM,NV)})} \quad (2)$$

Quando o cimento não é conhecido, adota-se para a perda ao fogo, o valor máximo especificado em norma ou de algum cimento de referência escolhido.

### 3) Resultados obtidos da análise química:

A análise química foi realizada em duas amostras (T1 e T2) para ter maior confiabilidade nos resultados obtidos, como apresentados na Tabela 6. A Tabela 7 apresenta a análise química do cimento empregado no cálculo do traço do concreto.

Como os resultados das duas amostras foram próximos, para o cálculo do traço de concreto foram empregados apenas o resultado da amostra 2 (T2).

Tabela 6 – Resultado da análise química dos testemunhos

TESTEMUNHOS DE CONCRETO				
Determinações	Resultados T1 (%)		Resultados T2 (%)	
	Base original	Base não volátil	Base original	Base não volátil
Umidade	0,25		0,09	
Perda ao fogo	3,69		3,56	
RI	75,72	78,70	76,35	79,14
SiO <sub>2</sub> solúvel	5,73	5,96	5,39	5,59

Tabela 7 – Resultados da análise química do cimento empregado

CIMENTO			
Tipo	Base original (%)		Base não volátil (%)
Cimento CP II F	SiO <sub>2</sub>	PF	SiO <sub>2</sub>
	18,96	5,96	20,09

#### 4) Análise dos resultados:

A partir dos resultados obtidos, calcula-se o proporcionamento provável e o traço do concreto, com base nas Equações (1) e (2):

$$\%Cim_{(ARG,NV)} = \frac{(\%SiO_{2(ARG,NV)} \cdot 100)}{(\%SiO_{2(CIM,NV)})} \quad \%Cim_{(ARG,NV)} = \frac{(5,59 \cdot 100)}{(20,09)}$$

$$\%Cim_{(ARG,NV)} = 27,81$$

$$\%Cim_{(ARG,OR)} = \frac{(\%Cim_{(ARG,NV)} \cdot 100)}{(100 - \%PF_{(CIM,NV)})} \quad \%Cim_{(ARG,OG)} = \frac{(27,81 \cdot 100)}{(100 - 5,96)}$$

$$\%Cim_{(ARG,OG)} = 29,57$$

O traço em massa do concreto é calculado a partir dos teores percentuais de seus constituintes, expressos em relação ao cimento, isto é, dividem-se os teores de agregado pelo teor de cimento, como visualizado na Tabela 8.

Tabela 8 – Traço em massa obtido pelo testemunho

Traço		Rel. Cim/Agre
Cimento	Agregado	
29,57 %	79,14%	1 / 2,68
1	2,68	1 / 2,68

Como a metodologia para a reconstituição do traço é para argamassas, o teor encontrado (**1:2,68**) corresponde a uma parte de cimento para 2,68 partes de agregado miúdo.

De acordo com dados fornecidos por técnicos que trabalharam na época da construção da Usina, a distribuição em porcentagem dos agregados era de 60% para o agregado graúdo e 40% para o agregado miúdo. Considerando que 2,68 representam 40% de agregado miúdo, 4,02 representaram a 60% de agregado graúdo. Portanto o traço empregado para a reconstituição do concreto foi de **1:6,7**, correspondendo a um consumo de cimento de 320 kg/m<sup>3</sup>, compatível com as informações prestadas pelos técnicos da obra. A Tabela 11 apresenta o traço utilizado para a confecção dos corpos-de-prova de concreto.

A areia natural empregada foi a comercial do porto de extração Brasil localizada próxima à região da usina, com porcentagem em volume de 40%, e a brita 1 utilizada foi a comercial da pedreira Sta. Isabel com porcentagem em volume de 60%, representando um consumo igual a 278,1 e 417,1 l kg/m<sup>3</sup> para areia e para brita, respectivamente. A relação água cimento foi igual a 0,58.

Para conferir o resultado encontrado, foi realizada uma nova sequência de cálculos para o concreto confeccionado com o traço **1:6,7**. Mais uma vez, amostras dos corpos-de-prova de concreto rompidos aos 28 dias foram preparadas para os ensaios químicos necessários. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado da análise química dos corpos-de-prova de concreto

Determinações	Resultados do corpo-de-prova (%)	
	Base original	Base não volátil
Umidade	0,44	-
Perda ao fogo	3,77	-
RI	78,3	81,60
SiO <sub>2</sub> solúvel	2,24	2,33

A partir dos resultados obtidos foram realizados os cálculos para a determinação e confirmação do traço encontrado.

$$\% Cim_{(ARG,NV)} = \frac{(2,33.100)}{(20,09)}$$

$$\% Cim_{(ARG,NV)} = 11,60$$

$$\% Cim_{(ARG,OG)} = \frac{(11,60.100)}{(100 - 5,96)}$$

$$\% Cim_{(ARG,OG)} = 12,34$$

Tabela 10 – Traço em massa paro o concreto confeccionado

Traço		Rel. Cim/Agre
Cimento	Agregado	
12,34 %	81,60%	1 / 6,61
1	6,61	1 / 6,61

Tabela 11 – Traço de concreto empregado para a confecção dos corpos-de-prova submetidos aos ensaios mecânicos

Laboratório CESP de Engenharia Civil																																																							
<b>APLICAÇÃO:</b> Lidiane Pesquisa e Desenvolvimento		Data: 26/8/2008 Calculado por: Michelan																																																					
Relação (1:m) 1: 6,7 Teor de Argamassa Seca 48,44 Volume de Argamassa 58,3		CIMENTO Cauê CP II F 32 AGREGADO Graúdo B 1 - Pedreira Santa Isabel AGREGADO Miúdo Areia Natural - Porto Extração Brasil SLUMP (cm) 6,0 a 10,0 AR (%)																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>VOLUME</th> <th>PESO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AR</td> <td>15,0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>AGREGADO</td> <td>695,2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>AGLOMERANTE</td> <td>103,8</td> <td>321,7</td> </tr> <tr> <td>ÁGUA</td> <td>186,0</td> <td>186,0</td> </tr> <tr> <td>TOTAL</td> <td>1000,0</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			VOLUME	PESO	AR	15,0		AGREGADO	695,2		AGLOMERANTE	103,8	321,7	ÁGUA	186,0	186,0	TOTAL	1000,0		Aditivos Polifuncional Superplastificante Incorporador de Ar																																			
	VOLUME	PESO																																																					
AR	15,0																																																						
AGREGADO	695,2																																																						
AGLOMERANTE	103,8	321,7																																																					
ÁGUA	186,0	186,0																																																					
TOTAL	1000,0																																																						
A/C 0,578 A/C Equivalente -		Retard. Super. Incorp.																																																					
% Volume Comb. Componentes % Vol. Agregado Volume por M3 Densidade S.S.S. Peso S.S.S. por M3 Absorção % Umidade % Água Livre % Peso de Água Livre Peso por M3		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>B1</th> <th>Areia</th> <th>Cim.</th> <th>Água</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>60,0</td> <td>40,0</td> <td>100,0</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>417,1</td> <td>278,1</td> <td>103,8</td> <td>186,0</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2,733</td> <td>2,611</td> <td>3,10</td> <td>1,00</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1140</td> <td>726</td> <td>321,7</td> <td>186,0</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,77</td> <td>0,32</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,07</td> <td>0,03</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,70</td> <td>0,29</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>8,0</td> <td>2,1</td> <td>10,1</td> <td>7,6</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1132</td> <td>724</td> <td>321,7</td> <td>193,6</td> </tr> </tbody> </table>			B1	Areia	Cim.	Água		60,0	40,0	100,0			417,1	278,1	103,8	186,0		2,733	2,611	3,10	1,00		1140	726	321,7	186,0		0,77	0,32				0,07	0,03				0,70	0,29				8,0	2,1	10,1	7,6		1132	724	321,7	193,6		
	B1	Areia	Cim.	Água																																																			
	60,0	40,0	100,0																																																				
	417,1	278,1	103,8	186,0																																																			
	2,733	2,611	3,10	1,00																																																			
	1140	726	321,7	186,0																																																			
	0,77	0,32																																																					
	0,07	0,03																																																					
	0,70	0,29																																																					
	8,0	2,1	10,1	7,6																																																			
	1132	724	321,7	193,6																																																			
<b>Conversões:</b>																																																							
90 L				101,9 65,2 28,95 17,42																																																			
Correção na Água - g		Temp. Concreto	Slump	Ar Lib/in <sup>2</sup>	Ar (%)	Peso Conc. Fresco	Dens. Ap.	Dens. Ap. Integr	Módulo de Finura																																														
		24,5 °C	7,0	17,0	3,8	24080		2,447																																															

De acordo com o procedimento executado chegou-se a um resultado bem próximo do esperado. A análise química realizada no concreto confeccionado com o traço **1:6,7**, resultou no valor correspondente ao traço **1:6,6**.

Na sequência foram realizados mais dois traços de concreto, um traço pobre (com consumo de cimento de 220 kg/m<sup>3</sup>) e um traço rico (com consumo de 420 kg/m<sup>3</sup>) para confirmar a metodologia proposta.

Aos 28 dias de idade o concreto foi rompido e levado para mais uma série de análises químicas correspondentes. Os resultados apresentam-se na Tabela 12.

Tabela 12 – Análise química do concreto pobre e rico

Determinações	Resultados em % do concreto pobre (220 kg/m <sup>3</sup> )		Resultados em % do concreto rico (420 kg/m <sup>3</sup> )	
	Base original	Base não volátil	Base original	Base não volátil
Umidade	0,08	-	0,29	-
Perda ao fogo	2,92	-	4,87	-
RI	84,00	86,52	74,11	77,93
SiO <sub>2</sub> solúvel	1,57	1,62	2,80	2,94

A partir dos resultados obtidos foram realizados os cálculos para a determinação do traço rico e pobre.

- **Traço rico:**

$$\%Cim_{(CON,NV)} = \frac{(2,94.100)}{(20,09)} \qquad \%Cim_{(CON,NV)} = 14,63$$

$$\%Cim_{(CON,OG)} = \frac{(14,63.100)}{(100 - 5,96)} \qquad \%Cim_{(CON,OG)} = 15,56$$

Nas Tabelas 14 e 15 encontram-se os valores correspondentes aos traços rico e pobre.

- **Traço pobre:**

- $\%Cim_{(CON,NV)} = \frac{(1,62.100)}{(20,09)} \qquad \%Cim_{(CON,NV)} = 8,06$

- $\%Cim_{(CON,OG)} = \frac{(8,06.100)}{(100 - 5,96)} \qquad \%Cim_{(CON,OG)} = 8,57$

Tabela 13 – Traço em massa paro o concreto rico e pobre

Traço rico		Rel. Cim/Agre
Cimento	Agregado	
15,56%	77,93%	1 / 5
1	5,00	1 / 5
Traço pobre		Rel. Cim/Agre
Cimento	Agregado	
8,57%	86,52%	1 / 10,1
1	10,09	1 / 10,1

Tabela 14 – Traço de concreto com consumo de cimento de 420 kg/m<sup>3</sup> (Traço rico)

Laboratório CESP de Engenharia Civil					
<b>APLICAÇÃO:</b> Lidiane		Data: 21/10/2008			
Pesquisa e Desenvolvimento		Calculado por: Michelan			
Relação (1:m)	1: 4,898				
Teor de Argamassa Seca	53,25				
Volume de Argamassa	62,2				
	VOLUME	PESO			
AR	15,0		CIMENTO Cauê CP II F 32		
AGREGADO	663,5		AGREGADO Graúdo B 1 - Pedreira Santa Isabel		
AGLOMERANTE	135,5	420,0	AGREGADO Miúdo Areia Natural - Porto Extração Brasil		
ÁGUA	186,0	186,0	SLUMP (cm) 6,0 a 10,0		
TOTAL	1000,0		AR (%)		
A/C	0,443	Aditivos		Polifuncional	
A/C Equivalente	-			Superplastificante	
				Incorporador de Ar	
		Retard.	Super.	Incorp.	
% Volume Comb.					
Componentes				B1	Areia
% Vol. Agregado				57,0	43,0
Volume por M3				378,2	285,3
Densidade S.S.S.				2,733	2,611
Peso S.S.S. por M3				1034	745
Absorção %				0,77	0,32
Umidade %				0,07	0,03
Água Livre %				0,70	0,29
Peso de Água Livre				7,2	2,2
Peso por M3				1026	743
<b>Conversões:</b>					
15 L				15,4	11,1
				6,30	2,90
Correção na Água - g	Temp. Concreto	Slump	Ar Lib/in <sup>2</sup>	Ar (%)	Peso Conc. Fresco
	24,6 °C	6,7	17,0	3,8	24080
					Dens. Ap.
					Dens. Ap. Integ.
					Módulo de Finura

Tabela 15 – Traço de concreto com consumo de cimento de 220 kg/m<sup>3</sup> (Traço pobre)

Laboratório CESP de Engenharia Civil		LCEC ISO 9002		CESP Companhia Energética de São Paulo				
APLICAÇÃO: Lidiane		Data: 21/10/2008						
Pesquisa e Desenvolvimento		Calculado por: Michelan						
Relação (1:m)	1:	10,06						
Teor de Argamassa Seca	53,30							
Volume de Argamassa	62,9							
	VOLUME	PESO						
AR	15,0							
AGREGADO	714,0							
AGLOMERANTE	71,0	220,0						
ÁGUA	200,0	200,0						
TOTAL	1000,0							
		CIMENTO		Cauê CP II F 32				
		AGREGADO Graúdo		B 1 - Pedreira Santa Isabel				
		AGREGADO Miúdo		Areia Natural - Porto Extração Brasil				
		SLUMP (cm)		6,0 a 10,0				
		AR (%)						
A/C	0,909	Aditivos		Polifuncional				
A/C Equivalente	-			Superplastificante				
				Incorporador de Ar				
		Retard.	Super.	Incorp.				
% Volume Comb.								
Componentes				B1	Areia	Cim.	Água	
% Vol. Agregado				52,0	48,0	100,0		
Volume por M3				371,3	342,7	71,0	200,0	
Densidade S.S.S.				2,733	2,611	3,10	1,00	
Peso S.S.S. por M3				1015	895	220,0	200,0	
Absorção %				0,77	0,32			
Umidade %				0,07	0,03			
Água Livre %				0,70	0,29			
Peso de Água Livre				7,1	2,6	9,7	7,3	
Peso por M3				1008	892	220,0	207,3	
<b>Conversões:</b>								
15 L					15,1	13,4	3,30	3,11
Correção na Água - g	Temp. Concreto	Slump	Ar Lib/in <sup>2</sup>	Ar (%)	Peso Conc. Fresco	Dens. Ap.	Dens. Ap. Integr	Módulo de Finura
	24,4 °C	4,0	15,5	5,3	22830		2,262	

#### 4.3.3. Ensaios mecânicos no concreto reconstituído

- **Resistência à compressão e módulo de elasticidade**

Foram moldados corpos-de-prova (CPs) cilíndricos, segundo as normas NBR 5739/94 e NBR 8522/03, sendo estes rompidos nas idades de 7, 28, 56 e 90 dias, totalizando assim 12 CPs, nas dimensões de 10 x 20 cm. Na determinação do módulo de elasticidade foi utilizado o plano de carga (tangente inicial) com a tensão fixada em 30% da tensão de ruptura do corpo-de-prova de referência.

Os corpos-de-prova foram capeados com enxofre para regularização de suas bases e levados à prensa de 100 toneladas para ruptura (Figura 48), com velocidade de carregamento manual.



Figura 48 – Ensaio de resistência à compressão



Figura 49 – Ensaio de módulo de elasticidade

▪ ***Resistência à tração por compressão diametral – NBR 7222/94***

O ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral, segundo a NBR 7222, foi realizado em três corpos-de-prova de concreto de dimensões 10x20cm, confeccionados no Laboratório CESP de Engenharia Civil e rompido nas idades de 7, 28, 56 e 90 dias. Foi tomada como resistência final a média aritmética dos resultados obtidos.

A prensa utilizada para este ensaio foi a mesma utilizada para o ensaio de resistência à compressão simples.

As amostras já rompidas foram destinadas às análises químicas para a confirmação da metodologia proposta de reconstituição do traço de concreto.



Figura 50 – CPs preparados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Figura 51 – Ruptura do CP posicionado com sua geratriz em contato com os pratos da prensa

Todos os corpos-de-prova moldados foram submetidos a duas diferentes condições de exposição (cura). A primeira refere-se à estocagem em câmara úmida até a idade definida para ensaio. Na segunda, os corpos-de-prova foram submetidos à mesma condição dos prismas de concreto conforme NBR 15577-6/08 até a idade de ensaio, sendo armazenados em ambiente agressivo (alta umidade e temperatura de 40°C).

As Figuras 52 e 53 ilustram as condições de armazenamento para os corpos-de-prova.



Figura 52 – Corpos de prova armazenados nos mesmos recipientes do ensaio NBR 15577-6



Figura 53 – Armazenamento dos CPs em câmara a 40°C

▪ ***Ensaio de permeabilidade – NBR 10786/89 no concreto reconstituído***

O ensaio de permeabilidade seguiu o método de percolação de água sob pressão, de acordo com a NBR 10786/89, em dois corpos-de-prova (CP) com dimensões 20x20 cm, nas idades de 28 e 90 dias. A Figura 54 ilustra o procedimento executado.



Laterais escarificadas com jato de areia – preparação com duas demãos de neutrol



CP acoplado ao bujão – vedação das laterais com piche



Etapa final da montagem do ensaio – no topo, uma camada de algodão, cascalho e brita



Ensaio montado e em andamento

Figura 54 – Procedimentos para a realização do ensaio de Permeabilidade

#### 4.4. METODOLOGIA APLICADA AOS AGREGADOS

##### 4.4.1. Ensaio de expansão pelo método acelerado ABNT – NBR 15577 – 4/2008.

Foram realizados ensaios de reatividade pelo método acelerado ABNT – NBR 15577 – 4/2008 em quatro tipos de materiais: agregado graúdo coletado do enrocamento da barragem, agregado graúdo comercial de pedreira da região da usina, agregado miúdo comercial e em testemunhos de sondagem da rocha de fundação da estrutura da TA.

De acordo com o método de ensaio, três barras de argamassa foram confeccionadas nas dimensões de 25mm x 25mm x 285mm, relação cimento:agregado igual a 1:2,25 e relação água/cimento de 0,47 (em massa), como visualizadas na Figura 55.



Figura 55 – Confeção das barras de argamassas para ensaio de reatividade

Após moldagem das barras, as mesmas foram curadas por 24 horas em câmara úmida seguidas por 24 horas de imersão em água a 80°C; após este período as barras foram imersas em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1N, e temperatura de 80 °C, (Figuras 56 e 57).



Figura 56 – Barras imersas em água a 80°C por 24 horas

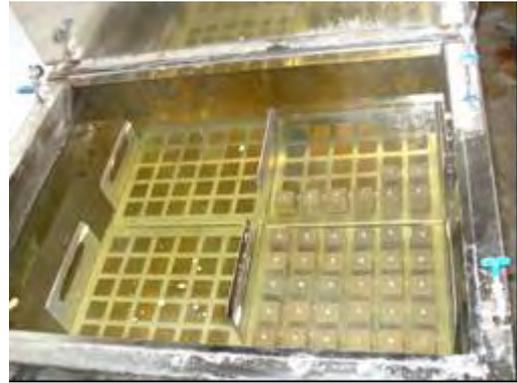


Figura 57 – Barras imersas em solução de hidróxido de sódio a 80°C.

As barras foram medidas periodicamente e os resultados expressos em porcentagem de expansão, correspondendo à média das três barras. As leituras (Figura 58) foram realizadas por 30 dias como estipulado pela norma.



Figura 58 – Leituras das barras de argamassas

Na Tabela 16 apresentam-se os resultados da análise físico-química fornecida pela ABCP do cimento padrão utilizado para confeccionar as barras de argamassa para o ensaio.

Tabela 16 – Características físico-químicas do cimento utilizado

Ensaio		Método de Ensaio	Valores certificados	Incerteza dos resultados
Álcalis Totais (%)	Na <sub>2</sub> O	ABNT NBR NM 17	0,32 %	0,02 %
	K <sub>2</sub> O	ABNT NBR NM 17	0,87 %	0,09 %
	Eq. Na <sub>2</sub> O	-	0,89 %	-
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		ABNT NBR NM 23/01	3,09	-
Área Específica – Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		ABNT NBR NM 76	4920	90 cm <sup>2</sup> /g
Expansão em Auto Clave (%)		ASTM C 151	0,02	0,008 %
Ensaio		Método de Ensaio	Resultados % em massa	Limites da NBR 05733/91
Perda ao fogo – PF		NBR NM 18/04	3,05	≤ 4,5 %
Dióxido de silício total – SiO <sub>2</sub>		NBR NM 11-2/04	19,52	-
Óxido de alumínio – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		NBR NM 11-2/04	4,80	-
Óxido de ferro – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		NBR NM 11-2/04	2,26	-
Óxido de cálcio total – CaO		NBR NM 11-2/04	62,33	-
Óxido de magnésio – MgO		NBR NM 11-2/04	1,90	≤ 6,5 %
Anidrido sulfúrico – SO <sub>3</sub>		NBR NM 16/04	3,64	≤ 4,5 %
Anidrido carbônico – CO <sub>2</sub>		NBR NM 20/04	2,59	≤ 3,0 %
Resíduo insolúvel – RI		NBR NM 15/04	0,31	≤ 1,0 %
Óxido de cálcio livre – CaO (livre)		NBR NM 13/04	1,21	-

#### 4.4.2. Ensaio em prisma de concreto – ABNT – NBR 15577 – 6/2008

Para a realização do ensaio, utilizou-se cimento padrão, fornecido pela ABCP e areia padrão fornecida pelo IPT, como agregado miúdo. Como procedimentos de dosagem, a nova norma da ABNT – NBR 15577 – 6/2008 preconiza como características necessárias do traço de concreto um consumo de cimento de 420 kg/m<sup>3</sup>, um equivalente alcalino de 1,25% Na<sub>2</sub>O (conseguido pela introdução de NaOH à água de amassamento), totalizando um teor de álcalis de 5,25 kg/m<sup>3</sup>, uma faixa de relação a/c de 0,42 a 0,45 em massa, além da seguinte consideração: “o volume de agregado graúdo em relação ao concreto em estado compactado seco deve ser de 70 ± 2 %”. A análise físico-química realizada no cimento Portland padrão fornecido pela ABCP para o ensaio está apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 – Características físico-químicas do cimento padrão utilizado

Álcalis Totais (%)	Na <sub>2</sub> O	0,30 %
	K <sub>2</sub> O	1,10 %
	Eq. Na <sub>2</sub> O	1,02 %
Álcalis Solúveis (%)	Na <sub>2</sub> O	0,25 %
	K <sub>2</sub> O	1,00 %
	Eq. Na <sub>2</sub> O	0,91 %
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		3,09
Área específica (cm <sup>2</sup> /g)		4860
Expansão em Auto Clave (%)		0,02

O procedimento de dosagem foi realizado no Laboratório CESP de Engenharia Civil e a planilha do traço de concreto é visualizada na Figura 59.

Para 12 litros de concreto (volume necessário para a confecção de seis prismas – três para a câmara com temperatura a 40°C e três para a câmara com temperatura a 60°C), tem-se 5040 g de cimento. Possuindo o cimento padrão um teor de Na<sub>2</sub>Oe de 1,02%, tem-se:

$$5040 * 1,02\% = 51,41 \text{ g de álcalis}$$

Para se obter 1,25% de Na<sub>2</sub>Oe, deve-se ter:

$$1,25\% * 5040 = 63,00 \text{ g de álcalis}$$

Torna-se necessária a adição de 11,59 g de Na<sub>2</sub>Oe. Sendo o fator de correção de Na<sub>2</sub>Oe para NaOH de 1,291, logo:

$$1,291 * 11,59 = 14,965 \text{ g de NaOH}$$

Essa adição alcalina é realizada devido à necessidade de maiores teores alcalinos para iniciar expansão em prismas de concreto (em laboratório) quando comparado com estruturas reais.

De acordo com a norma o agregado graúdo tem que ter dimensão máxima de 19 mm, totalizando 70% do volume do concreto no estado compactado seco. O agregado foi graduado nas frações visualizadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Frações granulométricas do agregado graúdo

Tamanho da Peneira		
Passante	Retida	Massa (%)
19 mm	12,5 mm	33
12,5 mm	9,5 mm	33
9,5 mm	4,75 mm	33

A moldagem foi realizada em uma betoneira de 20 l, para confecção de 12 l de concreto. Os materiais foram colocados na betoneira seguindo a ordem descrita na norma NBR 15577 – 6/2008. A Figura 60 ilustra as etapas da confecção do concreto.



Laboratório CESP de Engenharia Civil

<b>APLICAÇÃO:</b>	P&D - Pesquisa e Desenvolvimento	Data:	6/5/2008
	Programa 449 - Teste	Calculado por:	Michelan

Relação (1:m)	1:	4,912
Teor de Argamassa Seca		50,6
Volume de Argamassa		60,4

	VOLUME	PESO
AR	10,0	
AGREGADO	665,5	
AGLOMERANTE	135,5	420,0
ÁGUA	189,0	189,0
TOTAL	1000,0	

CIMENTO	Proced.	ABCP
	Alcalis	1,02 %
AGREGADO Graúdo		B 1 - Granito Ped. Santa Isabel
AGREGADO Miúdo		Areia Natural - IPT
SLUMP (cm)		
AR (%)		

A/C		Aditivos			
A/C Equivalente	0,450		Aditivo	Hidróxido de Sódio - NaOH	

M. U. Comp. Seca	1,565	Retard.	Super.	Incorp.
------------------	-------	---------	--------	---------

% Volume Comb.	Componentes	B1	Areia	Cim.	Água
% Vol. Agregado		60,2	39,8	100,0	
Volume por M3		400,8	264,7	135,5	189,0
Densidade S.S.S.		2,733	2,604	3,10	1,00
Peso S.S.S. por M3		1096	689	420,0	189,0
Absorção %		0,77	0,16		
Umidade %		0,04	0,01		
Água Livre %		0,73	0,15		
Peso de Água Livre		8,0	1,0	9,0	6,8
Peso por M3		1088	688	420,0	195,8

**Conversões:**

12 L						13,05	8,26	5,04		2,35
------	--	--	--	--	--	-------	------	------	--	------

Correção na Água - g	Temp. Concreto	Slump	Ar Lib/in <sup>2</sup>	Ar (%)	Peso Conc. Fresco	Dens. Ap.	Dens. Ap. Integr.	Módulo de Finura
	26,7 °C	3,8	18,0	2,5	23880		2,425	

**Datas de Rupturas:**

Número C.P.	Data Ruptura	Idade Dias	Tensão Mpa	Média Mpa	Número C.P.	Data Ruptura	Idade Dias	Tensão Mpa	Média Mpa
<b>Moldagem de 06 cps 7,5x7,5x28,5 c m</b>									
Brita	Kg	Areia	Kg						
# 12,5 mm	4,35	# 1,2 mm	2,89						
# 9,0 mm	8,70	# 0,6 mm	4,95						
# 4,75 mm	13,05	# 0,3 mm	7,02						
		# 0,15 mm	8,26						

Figura 59 – Traço (em massa) necessário para confeccionar seis prismas (7,5 x 7,5 x 28,5 cm) – 12 litros de concreto



Introdução da água com NaOH



Mistura do concreto



Trabalhabilidade pelo ensaio de abatimento (slump)



Verificação do teor de ar incorporado

Figura 60 – Etapas da confecção do concreto

Para realização do ensaio, foram confeccionados doze corpos-de-prova prismáticos de concreto de dimensões 7,5 x 7,5 x 28,5 cm, visualizados na Figura 61, sendo seis com agregado coletado do enrocamento e seis com agregado gráudo comercial de pedra da região da usina. A cura, armazenamento e remoção dos moldes dos prismas foram realizados de acordo com a NBR 15577 – 6/2008. Os prismas foram adensados em mesa vibratória em duas camadas.



Moldagem dos prismas em duas camadas



Rasura dos CPs

Figura 61 – Confeção dos prismas de concreto

Após a moldagem, os prismas permaneceram durante 24hs em câmara úmida. Depois deste período, foram desmoldados e a leitura inicial (primeira medida do corpo-de-prova), foi tomada através da utilização de relógio comparador com precisão na casa de milésimo de milímetros. Após a desforma e a leitura inicial, três prismas foram armazenados em recipiente a 38°C e três a 60°C (sendo encaixados em suportes) para cada agregado estudado.

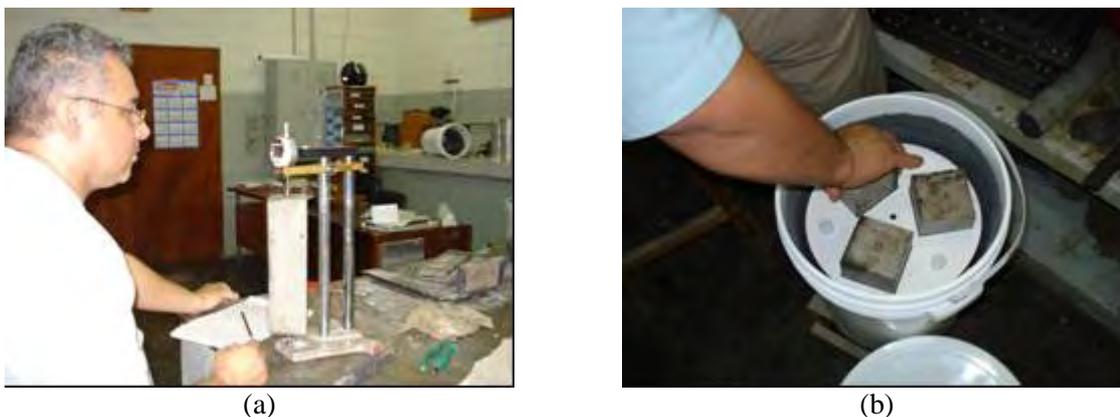


Figura 62 – (a) Leitura inicial dos CPs; (b) armazenamento nos suportes de cada balde

O recipiente de armazenamento continha uma película de água em seu fundo que permanecia com a distância de 1 cm dos prismas, para permitir umidade relativa de 100%, permanecendo às temperaturas desejadas de  $38 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , durante um ano e  $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , durante 6 meses.



Figura 63 – Câmara térmica (40° e 60°C) para acondicionamento dos prismas de concreto

As leituras foram realizadas nas idades de 7, 28 e 56 dias, bem como a 3, 6, 9 e 12 meses, para a temperatura de 40°C e aos 7, 28 e 56 dias, 3 e 6 meses para a temperatura de 60°C. Antes de cada leitura, os corpos-de-prova foram retirados da câmara de armazenamento e depositados em uma sala com temperatura de  $23 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$  por  $16 \pm 4$  hs.

Os resultados foram expressos em porcentagem de expansão. Segundo a NBR 15577 – 6/2008, expansões a um ano maiores que 0,04 % (ensaio a 40°C) indicam o comportamento deletério do agregado.

Para o ensaio acelerado em prismas de concreto (60° C) seguiu-se a recomendação proposta por Sanchez (2007). O autor comenta que expansões maiores que 0,04% aos 120 dias de idade indicam comportamento deletério do agregado.

#### 4.4.3. Ensaio de tração na flexão dos prismas de concreto do ensaio NBR 15577-6

Os prismas de concreto submetidos aos ensaios da NBR 15577-6 à temperatura de 60°C foram rompidos pelo ensaio de tração na flexão descrito pela NBR NM 55/1996 em 4 pontos, aos 182 dias de idade, em uma prensa hidráulica de 20 toneladas (Figura 64).

Essa análise foi usada para avaliar a resistência do concreto submetido à condição de exposição em câmara com temperatura de 60° C e alta umidade.

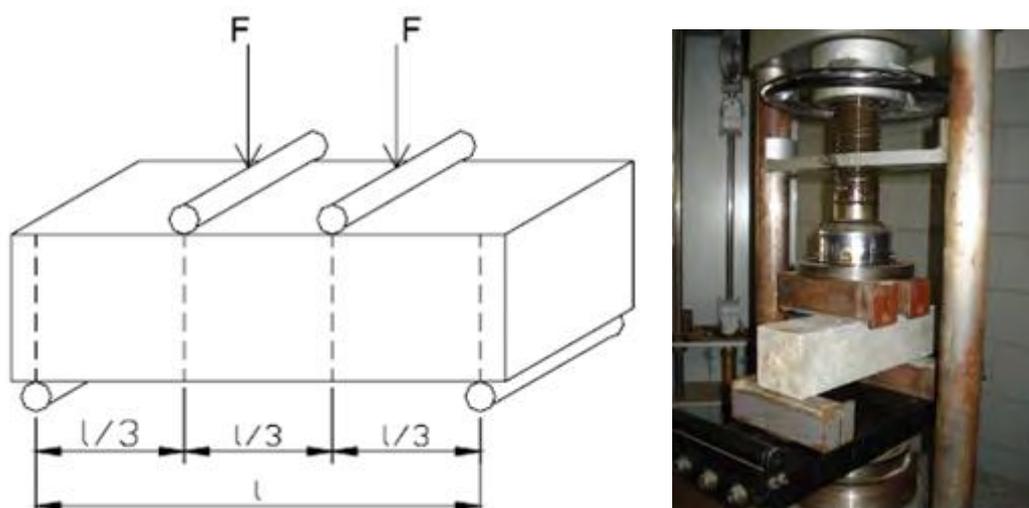


Figura 64 – Corpo de prova prismático na condição do ensaio de flexão – NBR NM 55/1996

#### 4.4.4. Ensaio Osipov

Este método, desenvolvido pelo engenheiro Albert Osipov, do Institute Hydroproject de Moscou, consiste em submeter o agregado graúdo, nas dimensões de 20 mm a 50 mm, à temperatura de 1000°C, durante 60 segundos.

O método basea-se na premissa de que o agregado contendo fase mineralógica reativa, ao ser exposto à temperatura elevada fragmenta-se, dando indícios de sua potencialidade

expansiva, caso seja colocado em condições propícias. Por outro lado, a não fragmentação do agregado não dá subsídios para conclusões finais a respeito do comportamento não reativo, necessitando de estudo complementar de outras metodologias.

#### **4.4.5. Análise Petrográfica e mineralógica**

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) realizou ensaios em prismas de concreto confeccionado com agregado coletado do enrocamento da barragem e submetido à temperatura de 40°C (amostra: ERC – 38) e a temperatura de 60°C (amostra: ERC – 60), e em prismas confeccionados com agregado da pedreira Sta. Isabel, submetido a temperatura de 60°C (amostra: ISA – 60), por meio de análise petrográfica, para identificar minerais potencialmente reativos. As técnicas utilizadas foram: observações macroscópicas e microscópicas através de microscopia estereoscópica (luz refletida) e microscopia óptica (luz transmitida) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2009, p.1-30).

As amostras foram preparadas seguindo o mesmo procedimento descrito em 4.2.5.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1. INVESTIGAÇÃO DOS TESTEMUNHOS EXTRAÍDOS

#### 5.1.1. Inspeção visual nos testemunhos extraídos

As fotografias apresentadas nas Figuras 65 e 66 registram as principais manifestações observadas em alguns dos testemunhos extraídos.



Bordas escuras de reação ao redor do agregado – Típica da RASS. Manchas brancas no agregado



Poros preenchido com material branco de aspecto porcelânico (seta)



Bordas de reação



Fissura contornando o agregado

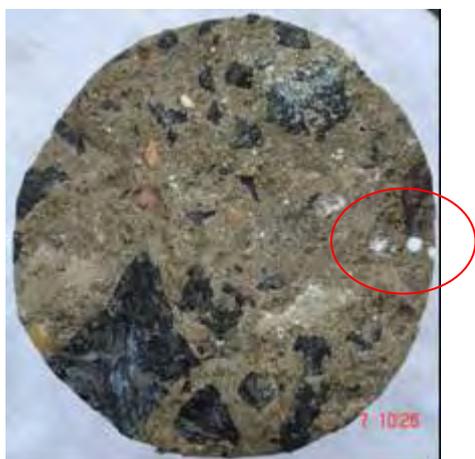
Figura 65 – Inspeção visual nos testemunhos extraídos



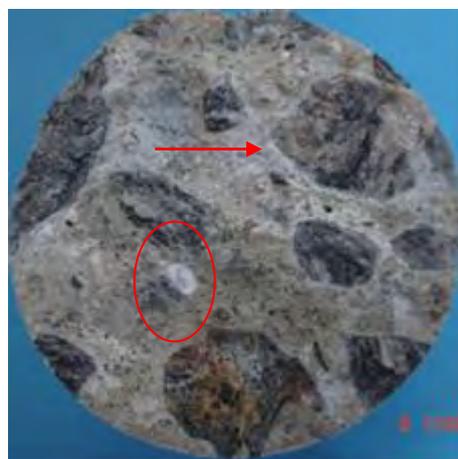
Poros brancos e bordas de reação –  
Laje da TA



Fissura com deposição de material branco (seta) –  
Laje da TA



Poro com deposição de material branco com  
aspecto porcelânico (círculo) – pilar da ponte  
na TA



Gel contornando o agregado (seta) e poro  
preenchido com material branco – Laje da TA



Borda preenchida com gel contornando o  
agregado (seta). Material branco com  
aspecto porcelânico (círculo) próximo ao  
agregado – Pilar da ponte da TA



Bordas de reação (seta), poro com deposição de material  
branco com aspecto porcelânico (círculo) – Pilar da  
ponte da TA

Figura 66 – Inspeção visual nos testemunhos extraídos

As amostras estudadas foram examinadas macroscopicamente, visando selecionar as que pudessem apresentar evidências de reação álcali-agregado.

Normalmente foram observadas deposições de material esbranquiçado na superfície dos agregados graúdos ou mesmo disseminados na argamassa. Observaram-se também indícios claros da instauração da reação álcali-agregado com a deposição de material branco nas superfícies de quebra do concreto, presença de bordas de reação e preenchimento dos poros por material branco de aspecto porcelânico.

### 5.1.2. Ensaio de expansão residual nos testemunhos extraídos

Os testemunhos retirados da laje da Tomada d'água foram preparados e submetidos ao ensaio de expansão residual, como mostra a Figura 67.

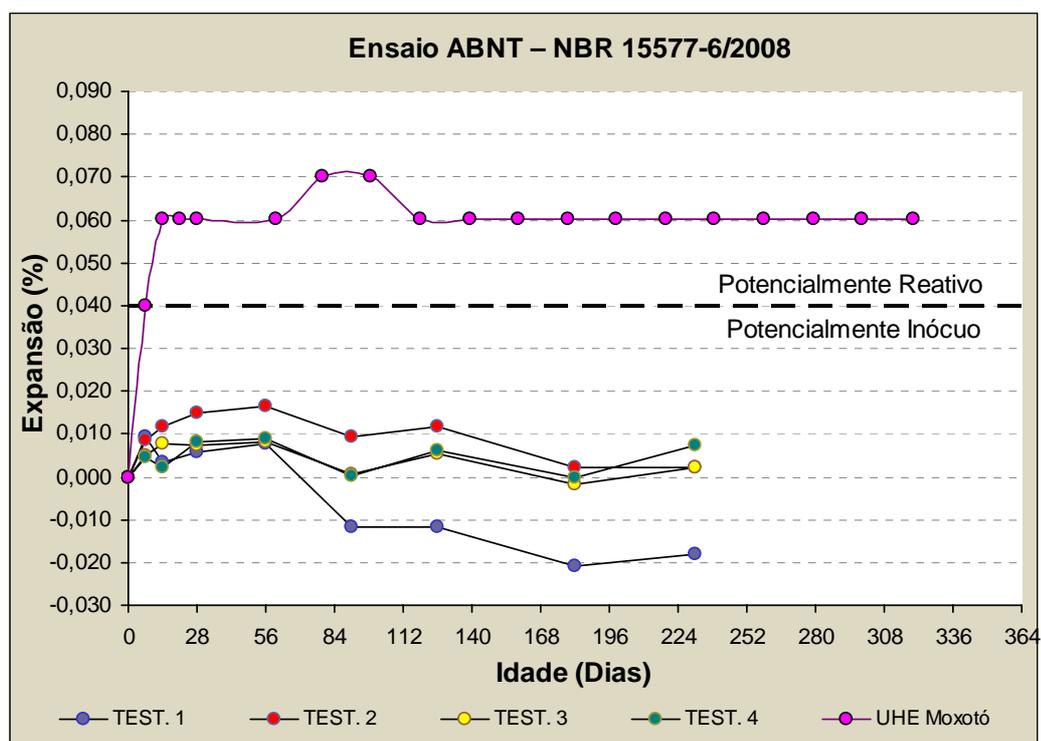


Figura 67 – Ensaio de expansão residual nos testemunhos extraídos da laje da TA

Verifica-se, para a condição de exposição dos quatro testemunhos mantidos na câmara a 40°C, que até a idade de 231 dias as expansões oscilaram gradativamente, notando-se uma movimentação, porém com uma baixa intensidade da reação.

A maior expansão observada durante o período de ensaio foi de 0,017% para a amostra Test. 2, aos 56 dias de exposição, ficando bem abaixo da faixa de potencialmente reativa (0,04%). Percebe-se melhor o comportamento expansivo das amostras estudadas

quando comparadas com amostra de testemunho extraído da localização El.214,0 m da UHE Moxotó (SILVA, 2007) submetida à uma condição de exposição diferente à realizada nessa pesquisa (testemunhos submersos em água e temperatura de 38°C).

Nota-se que as expansões das amostras Test.2, Test.3 e Test.4 são irrisórias, podendo ser consideradas constantes. Já para a amostra Test.1 observa-se comportamento de retração do testemunho. É importante ressaltar que os quatros testemunhos foram mantidos nas mesmas condições de armazenamento e a cada seqüência de leitura, os quatro eram retirados da condição de exposição juntos, havendo pouca influência no resultado, de erros de leituras e acondicionamento. Logo, pode haver outras causas para a ocorrência de retração em testemunhos de concreto expostos à ensaios de expansão residual.

Silva (2007) também comenta a ocorrência de variações e às vezes, até inconsistência nos resultados do ensaio de expansão residual realizado em testemunhos, como ocorrência de retração em algumas leituras. Estes comportamentos ocorrem, segundo a pesquisadora, provavelmente, devido a problemas na fixação dos pinos, posicionamento das amostras no aparelho de leitura, ou outros não conhecidos. Estas oscilações foram comentadas por Hasparyk (2005), que observou esta dificuldade na realização do ensaio de expansão residual em concretos extraídos, não ocorrendo o mesmo para os concretos moldados em laboratório.

Com relação ao término das expansões, ainda não são possíveis conclusões seguras, devendo-se estender por mais tempo os ensaios. Kuperman et al (1997) comentam que este prazo deve ser de 24 meses de observação, complementados com informações petrográficas dos concretos.

### 5.1.3. Análise petrográfica

#### ➤ **Microscopia óptica de luz refletida – Realizada no LCEC**

A análise microscópica foi realizada em um microscópio estereoscópico de luz refletida da marca Olympus, modelo SZ 61, visualizado na Figura 68.

Quando observadas ao microscópio, as amostras exibem a formação de xero-gel, por assim dizer, que é o estado cristalizado (sólido) do gel de formação da RAA (gel: fluído/viscoso). O xero-gel encontra-se na interface do agregado com a argamassa, onde nota-se também a presença de microfissuras, muitas delas preenchidas por esse material.



Figura 68 – Microscópio estereoscópico de luz refletida utilizado na análise

Com relação a reação álcali-agregado, as amostras apresentam, em maior ou menor intensidade, poros preenchidos total ou parcialmente por material branco\* cristalizado (xerogel) ou por material esbranquiçado de aspecto porcelânico/gelatinoso (gel da RAA).

Na Figura 69 nota-se um fragmento de concreto recoberto por material branco de aspecto porcelânico/gelatinoso.

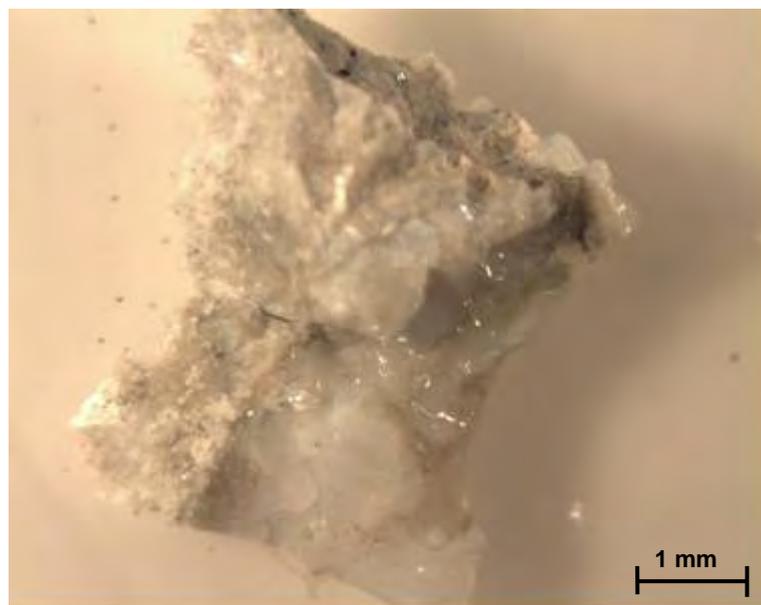


Figura 69 – Material coletado de testemunho da UHE Jaguari

Cabe lembrar que, como produtos secundários da reação, são comuns carbonatos e etringita, que também podem ocorrer independentemente da reação álcali-agregado.

A Figura 70 mostra a ocorrência de porosidade no contato com agregado graúdo. Notar superfície branca aderida ao agregado graúdo. Presença de carbonatação localizada ao redor de vazios.



Figura 70 – Aspecto do concreto da UHE Jaguari – Fragmento 1 do testemunho

Notam-se na Figura 71, que são frequentes os poros preenchidos, total ou parcialmente, por material branco cristalizado/porcelânico (xero-gel).



Figura 71 – Aspecto do concreto da UHE Jaguari – Fragmento 3 do testemunho

Na Figura 72 observar gel da reação (branco porcelânico) desenvolvendo-se no contato agregado/argamassa.



Figura 72 – Aspecto do concreto da UHE Jaguari – Fragmento 5 do testemunho

## 5.2. INVESTIGAÇÃO DO CONCRETO RECONSTITUÍDO

### 5.2.1. Propriedades mecânicas

O objetivo do estudo das propriedades mecânicas foi caracterizar o concreto reconstituído em laboratório, curado em condições normais (câmara úmida) e em ambiente agressivo (temperatura de 40°C e 100% de umidade).

Silva (2007) atenta para o fato de se conhecer a influência da reação álcali-agregado nas propriedades de concretos convencionais fabricados em laboratório.

As Figuras 73 e 74 apresentam os resultados de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, do concreto confeccionado com o traço reconstituído, mantidos em câmara úmida e em ambiente agressivo.

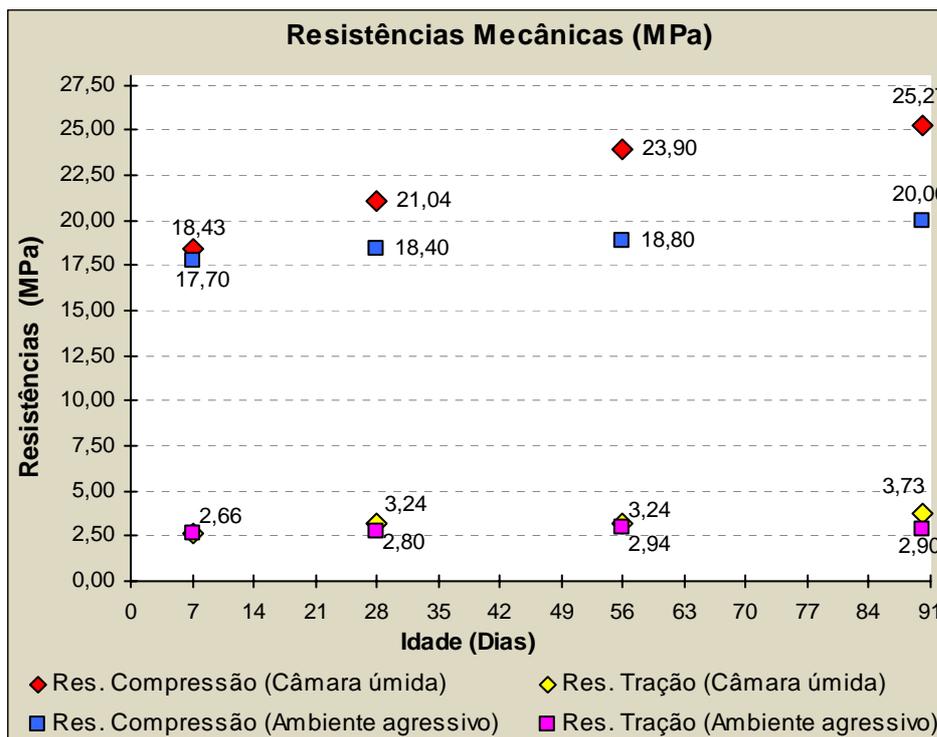


Figura 73 – Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral do concreto reconstituído em laboratório sob duas condições de cura

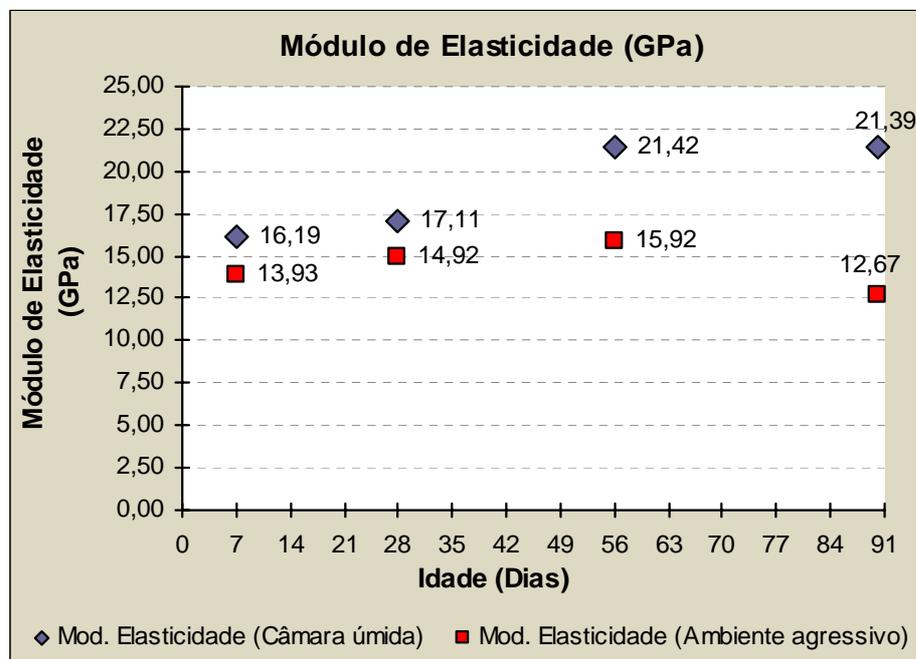


Figura 74 – Módulo de elasticidade do concreto reconstituído em laboratório sob duas condições de cura

Para a condição de armazenamento em câmara úmida, verificou-se que o concreto confeccionado com o traço reconstituído da estrutura da Tomada d'água da UHE Jaguari

apresentou resultados de compressão e módulo de elasticidade com valores médios de 23 MPa e 19 GPa, respectivamente, mostrando-se compatíveis com concretos utilizados para este tipo de construção e executados no mesmo período e com as mesmas características. Os corpos-de-prova mantidos em ambiente agressivo apresentaram queda no valor da resistência à compressão se comparados aos mantidos em câmara úmida. Essa diferença foi de 7% aos 7 dias, 12,4% aos 28 dias, 21,3% aos 56 dias e de 20,85% aos 91 dias.

Giaccio et. al (2008) compararam um concreto de referência (sem agregado reativo) com concretos constituídos com agregados reativos. Os autores verificaram que nos concretos que foram usados agregados reativos, embora haja um aumento no valor de resistência à compressão, o módulo de elasticidade cai, mostrando o dano interno causado pela RAA no concreto.

No entanto, para o concreto moldado com o agregado estudado, houve uma suave queda, no valor do módulo de elasticidade da idade de 56 dias para a idade de 91 dias, para os corpos-de-prova mantidos em câmara úmida. Já para os mantidos em ambiente agressivo, na idade de 90 dias, houve queda no valor do módulo de elasticidade de 20,4%.

Com relação ao ensaio de resistência à tração, os resultados mostraram-se dentro da faixa de correlação, sendo a relação entre a tração por compressão diametral e a resistência à compressão na faixa de 8 a 15 %. (SCANDIUZZI; ANDRIOLO, 1986, p.447).

A condição de armazenamento agressiva (100% de umidade e temperatura de 40°C) apresentou valores inferiores, porém muito próximos dos valores encontrados quando expostos à câmara úmida. Pode-se dizer, no entanto, que o concreto não sofreu efeitos negativos ocasionados pela reação álcali-agregado, para este relativamente curto período de tempo, se comparado à vida útil de uma estrutura.

### 5.2.2. Ensaio de permeabilidade

Os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos para os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de percolação de água sob pressão e mantidos em câmara úmida encontram-se apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados dos coeficientes de permeabilidade dos corpos-de-prova moldados (m/s)

Idade (dias)	28	90
CP 1	2,08E-10	1,01E-10
CP 2	1,62E-11	2,72E-11
Média (m/seg)	1,12E-10	5,12E-11
Desvio Padrão (m/seg)	1,36E-10	7,10E-11

Os valores do coeficiente de permeabilidade determinados apresentam-se dentro da faixa para este tipo de concreto, denotando concretos de baixa permeabilidade (NEVILLE, 1997, p.490). De acordo com o autor, a permeabilidade do concreto também é influenciada pela permeabilidade do agregado.

Nos estudos de Hasparyk (2005) foram encontrados valores da ordem de  $1,04E-12$  (considerado concreto de baixa permeabilidade) para corpos de prova mantidos em câmara úmida. Vale destacar a diferença entre os concretos moldados. A pesquisadora utilizou concreto com um consumo de cimento  $420 \text{ kg/m}^3$  que também influencia nos valores de permeabilidade.

Scanduzzi e Andriolo (1986, p. 467) comentam que conforme resumo dos estudos de concreto para a barragem de Água Vermelha da CESP, pode-se admitir que concretos de usos normais com diâmetros máximos de 19 a 152 mm apresentam coeficiente de permeabilidade da ordem de  $1E-11$  a  $1E-13 \text{ m/s}$ .

### 5.3. INVESTIGAÇÃO DO AGREGADO

#### 5.3.1. Ensaio de expansão pelo método acelerado ABNT – NBR 15577 – 4/2008

##### ➤ *Agregados graúdos*

A Figura 75 apresenta o resultado do ensaio acelerado pelo método NBR 15577-4 para o agregado coletado do enrocamento da barragem, agregado coletado da pedra comercial Sta. Isabel e do testemunho de sondagem da rocha de fundação da Tomada d'água da UHE Jaguari.

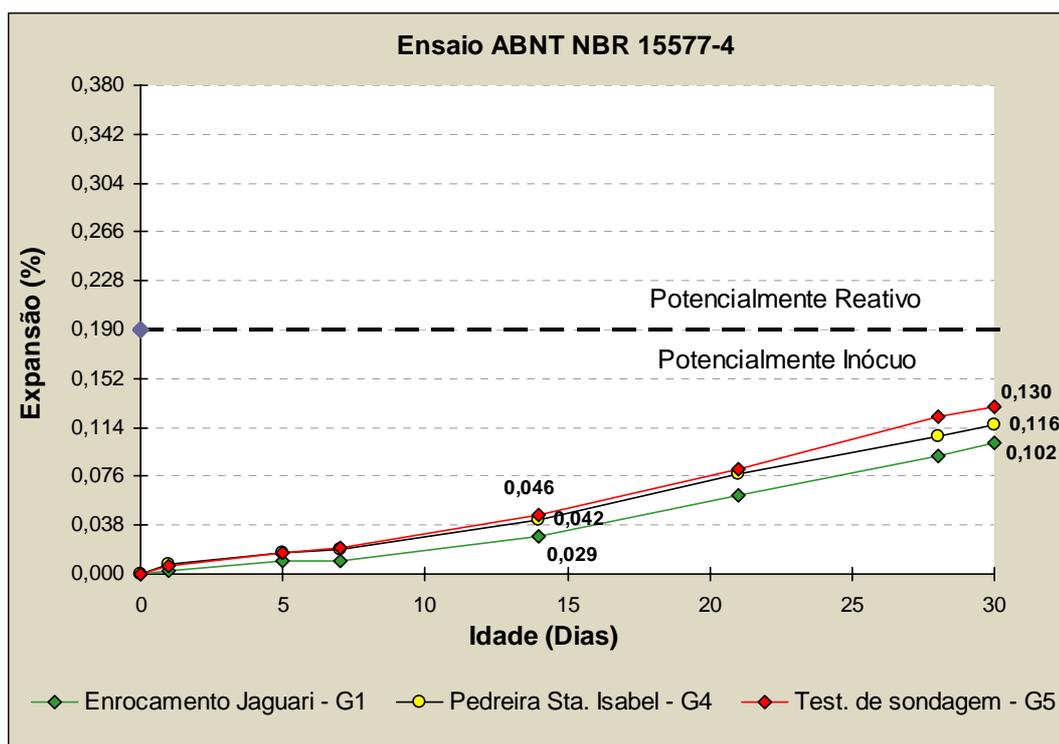


Figura 75 – Resultado de expansão pelo método NBR 15577 – 4 para os agregados graúdos estudados

Analisando os agregados a partir dos limites apresentados pela nova norma brasileira, verifica-se comportamento potencialmente inócuo aos 30 dias (valor definido para o ensaio). Contudo, é importante comentar que o comportamento expansivo é crescente, dando indícios de continuidade da reação.

Cabe lembrar que o processo expansivo ocasionado para os agregados estudados é o tipo álcali-silicato, com expansões mais baixas nas primeiras idades.

Como a norma NBR 15577-4 recomenda idade de avaliação de 30 dias, alguns equívocos na classificação da reatividade potencial dos agregados podem ocorrer. Agregados com comportamentos mais lentos podem ser classificados como inócuos, mesmo sendo deletérios na presença dos álcalis.

Owsiak (2004, p.7) apresentou resultados também abaixo do limite estabelecido como potencialmente reativo (0,1% segundo ASTM C1260), para barras de argamassas confeccionadas com agregados graníticos, o que permitiu classificar o agregado como não reativo. Entretanto, depois dos 21 meses, as expansões chegaram a alcançar valores de 0,6 %.

Tiecher e Dal Molin (2006, p.8) avaliaram o comportamento de 39 amostras de agregados no ensaio acelerado prescrito pela ASTM C 1260 com 4 tipos de cimentos Portland. Os resultados mostraram que vários agregados poderiam ser classificados como

inócuos na idade de 16 dias, mas, estendendo-se o ensaio até os 28 dias foram considerados reativos ou potencialmente reativos aos álcalis. As autoras concluíram que sob certas condições, os agregados podem demorar mais para apresentar expansões consideradas deletérias no ensaio, o que acaba por justificar que a medição das expansões se estenda por um período maior.

De acordo com a norma americana ASTM C 1260 os agregados estudados na pesquisa seriam classificados como inócuos aos 16 dias de idade e aos 28 dias, considerados potencialmente reativos. É importante comentar que o índice de classificação do comportamento reativo dos agregados, prescrito pela nova norma brasileira de reatividade (NBR 15577-4/08 que é de 0,19%) deveria ser inferior ao estabelecido, visto às baixas taxas de expansão que alguns materiais possuem. Nesse estudo ficou bastante claro que, principalmente os gnaisses e as areias de rio denotam em um desenvolvimento mais lento das expansões.

#### ➤ Agregados miúdos

A Figura 76 apresenta os resultados de expansão da areia padrão fornecida pelo IPT e da areia comercial Porto de Extração Brasil localizada próxima à usina.

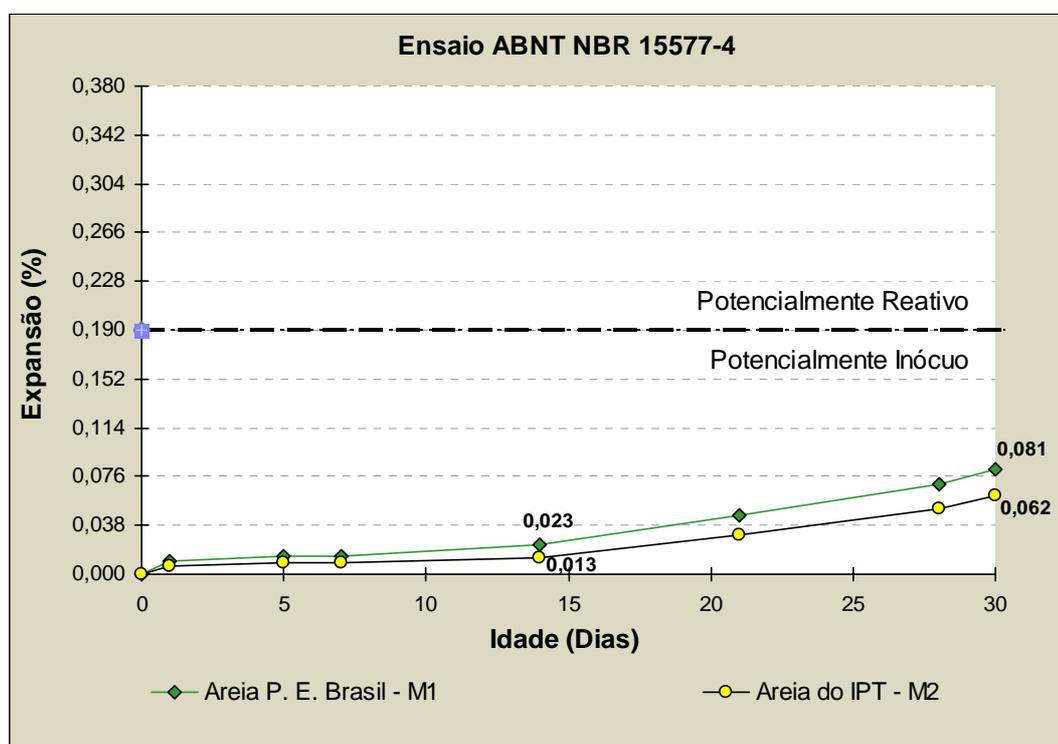


Figura 76 – Resultado de expansão pelo método NBR 15577 – 4 para os agregados miúdos estudados

Os resultados apresentados na Figura 76 mostram comportamento potencialmente inócuo para os dois agregados miúdos estudados na idade de referência da norma (30 dias), apresentando expansões de 0,081% para a areia comercial e 0,062% para a areia fornecida pelo IPT.

Assim como apresentado na Figura 75, as areias empregadas mostram-se com tendências crescentes de expansão, indicando potencial expansivo se estendido o período de ensaio. Contudo, o prolongamento do ensaio acelerado em barras de argamassa causa divergência entre o meio técnico. Uma possível explicação para o comportamento expansivo dos agregados, quando expostos a longos períodos de ensaios, é a existência de uma disponibilidade inesgotável de álcalis e, conseqüentemente, de íons hidroxila necessários à reação (MUNHOZ, 2007). O autor comenta que há um ingresso de íons Na<sup>+</sup> da solução para o interior da barra, ocasionando assim o progresso das expansões.

No caso dos granitos e das areias de rio, a fase mineralógica reativa é o quartzo deformado, o qual, de acordo com diversos autores, resulta num desenvolvimento mais lento das expansões, pois desencadeia a reação álcali-silicato (HASPARYK, 1999, VALDUGA, 2002, TIECHER, 2006). Aliás, o comportamento lento dos granitos e gnaisses é previsto pela própria ASTM C 1260, que recomenda que sejam feitas investigações adicionais nesse tipo de agregado.

### **5.3.2. Ensaio em prismas de concreto ABNT – NBR 15577-6/2008**

#### **➤ Ensaio ABNT – NBR 15577-6/2008 à 40°C**

A Figura 77 apresenta os resultados do ensaio de reatividade para prismas mantidos em câmara à temperatura de 40°C.

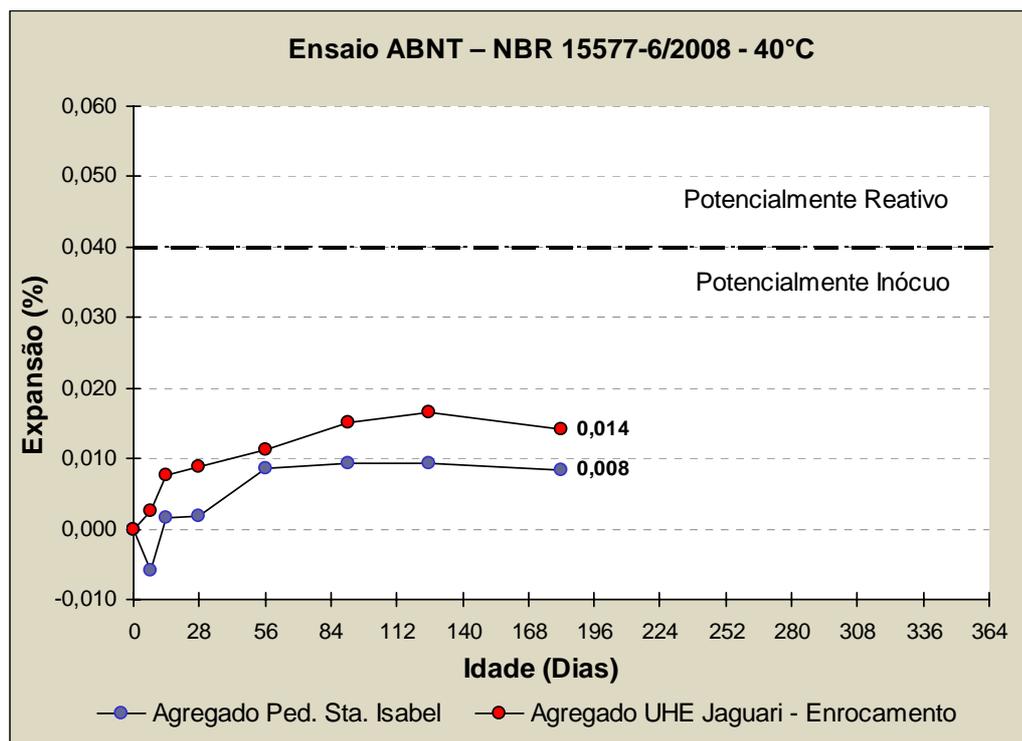


Figura 77 – Resultado de expansão pelo método NBR 15577 – 6 submetidos à temperatura de 40°C para os agregados estudados

Os resultados mostram que as expansões para os dois agregados estudados estão abaixo do limite estabelecido como potencialmente reativos (expansão de 0,04% a 1 ano), com valores de 0,008% para o agregado da pedra comercial Sta. Isabel e 0,014% para o agregado coletado do enrocamento da barragem.

Salles, Kuperman e Bertolucci (2006) estudaram um tipo de agregado granítico gnáissico pelo ensaio em prismas de concreto submetidos à temperatura de 40°C, e concluíram que o material pode ser considerado como não reativo, pois a expansão máxima não supera 0,04% após um ano de ensaio.

Pode-se afirmar que as duas curvas de expansão do gráfico estão praticamente constantes, visto que as diferenças nos valores de expansão estão na quarta casa decimal, não indicando comportamento de retração.

A curva de expansão dos prismas de concreto confeccionado com agregado da pedra comercial Sta. Isabel apresentou um ponto de retração na primeira leitura realizada. Acredita-se que esse comportamento é atribuído à própria metodologia de ensaio, que prevê o acondicionamento dos prismas depois da desforma em câmara úmida por 24 horas, para em seguida realizar a primeira leitura de referência. Para evitar essa situação, os prismas deveriam ser acondicionados após a desforma já no próprio ambiente do ensaio.

Adicionalmente, durante o ensaio de expansão, os prismas de concreto eram inspecionados visualmente com o objetivo de verificar o surgimento de sintomas de deterioração da RAA.

Sendo assim, já nos primeiros meses já se notava alguma manifestação decorrente da reação, começando a surgir eflorescências na superfície da maioria das amostras, como visualizadas na Figura 78, devido a lixiviação dos compostos calcários.

Ao longo do tempo estas características foram ficando mais intensas, sendo observado comportamento visual semelhante para as amostras com agregado coletado do enrocamento da UHE e da pedra comercial Sta. Isabel.



Agregado UHE Jaguari – Enrocamento  
Ensaio a 40° C



Agregado da pedra Sta. Isabel  
Ensaio a 40° C

Figura 78 – Vista geral dos prismas de concreto com eflorescências na superfície - 6 meses.

Além da relação água/cimento e do grau de adensamento, o tipo de fôrma pode ter alguma influência na lixiviação (NEVILLE, 1997). Na Figura 79 notam-se produtos carbonatados aderidos nas paredes do suporte dos prismas do ensaio NBR 15577-6.



Figura 79 – Produtos carbonatados aderidos nas paredes do suporte dos prismas

Além da verificação das superfícies dos prismas também foi tomado o cuidado de acompanhar a sua variação de peso no decorrer do ensaio. Portanto, a cada seqüência de leitura, tanto a 40°C como a 60°C, os prismas foram pesados e os resultados, para a temperatura de 40°C, apresentados na Figura 80.

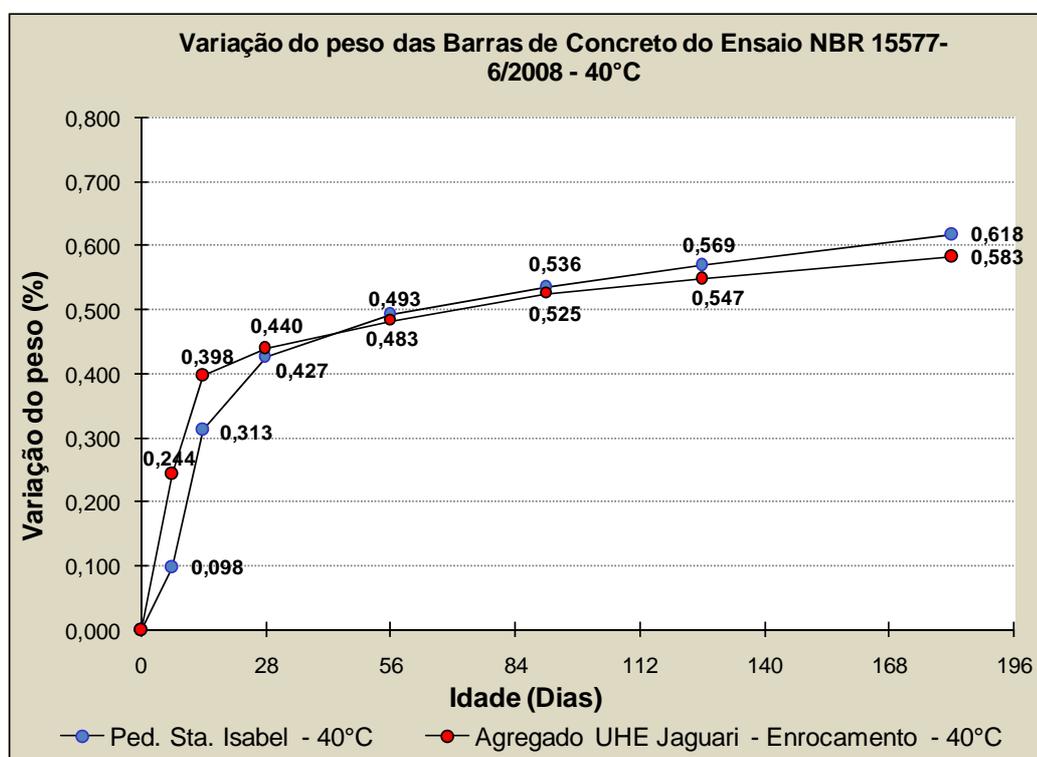


Figura 80 – Variação do peso dos prismas de concreto expostos ao ensaio NBR 15577 – 6 submetidos à temperatura de 40°C

Nota-se que para os dois agregados estudados houve um ganho de peso no decorrer do ensaio até a idade de 182 dias, sendo esse ganho para o agregado da pedreira Sta. Isabel de 0,618% e para o agregado coletado do enrocamento de 0,586%.

Com a lixiviação de parte do hidróxido de cálcio, há um aumento da porosidade do concreto, que faz com que a entrada de água seja maior, incrementando o peso dos prismas, mesmo a massa específica do  $\text{CaOH}_2$  (2,26 g/cm<sup>3</sup>) sendo superior à da água. Acredita-se, portanto, que o ganho de peso dos prismas pode estar atribuído ao efeito da absorção de água e ao entumescimento dos poros, pois ambos os materiais apresentaram expansões quase constantes quando expostos à temperatura de 40°C, não havendo ganho de peso em virtude de produtos formados (gel) na reação álcali-agregado, muito embora a densidade dos géis obtidos do concreto da UHE Furnas, gire em torno de 2,16 g/cm<sup>3</sup>, segundo Hasparyk (2005, p.214).

➤ **Ensaio ABNT – NBR 15577-6/2008 à 60°C**

A Figura 81 apresenta os resultados do ensaio de expansão acelerada da NBR 15577-6 em prismas de concreto expostos à temperatura de 60°C.

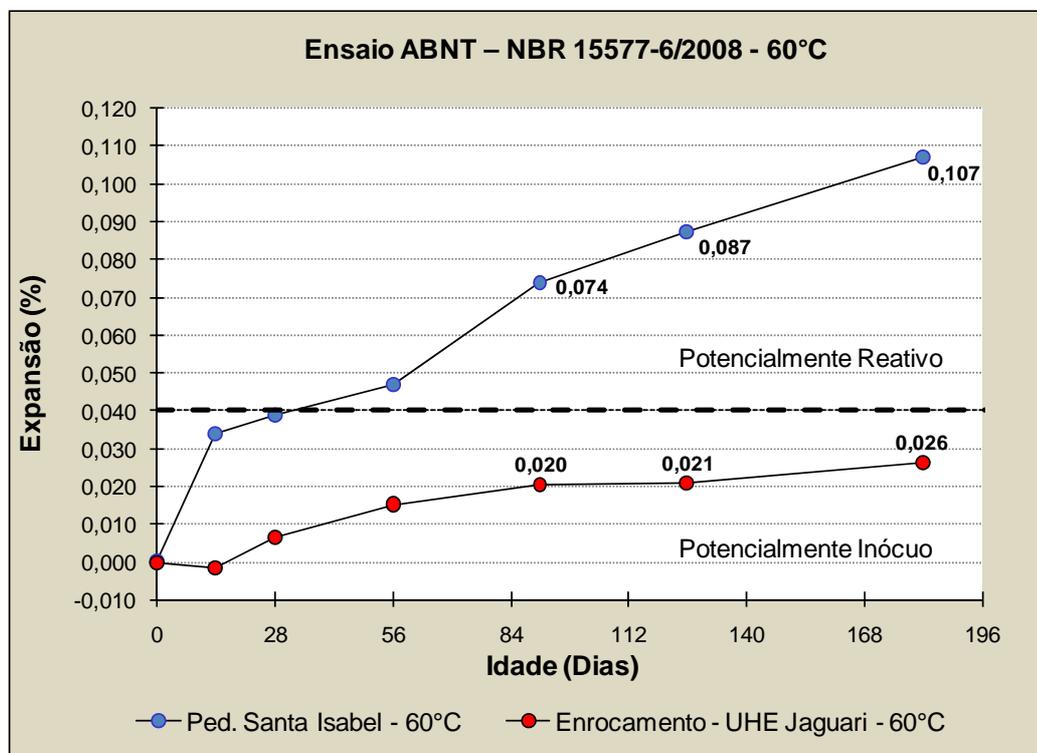


Figura 81 – Resultado de expansão pelo método NBR 15577 – 6 submetidos à temperatura de 60°C para os agregados estudados

A curva de expansão para o agregado da pedreira comercial Sta. Isabel, atingiu na idade de 120 dias, expansões de 0,087%, indicando a potencialidade reativa do material e na idade final do ensaio, 182 dias, expansões que alcançaram 0,107%.

Pode-se perceber através do ensaio que o período de 90 dias para a classificação de agregados, também aponta sua potencialidade reativa. Aos 3 meses a expansão média dos prismas com agregado da pedreira Sta. Isabel encontra-se com 0,074%, indicando sua reatividade frente aos álcalis.

Segundo Sanchez (2008) a data de 120 dias para classificação de agregados pelo método acelerado de prismas de concreto é bastante interessante, se comparados com a idade de 90 dias, em virtude dos resultados de correlação encontrados por ele. Levando em consideração o índice de correlação, assim como a facilidade de classificação, o autor sugere que os agregados sejam classificados aos 4 meses, ou 120 dias.

Em contrapartida, Salles, Kuperman e Berlolucci (2006) verificaram que uma expansão de 0,04% no ano, a 38°C, corresponde a cerca de 0,035% de expansão em 90 dias, a

60°C. Segundo Fournier et al. (2004), em cerca de 90% dos casos o ensaio acelerado corrobora, em 90 dias, os resultados obtidos no prazo de um ano para exposição a 40°C.

Nos resultados encontrados, tanto aos 90 dias quanto aos 120 dias o agregado coletado do enrocamento da barragem apresentou comportamento potencialmente inócuo. Analisando a curva de expansão para esse agregado, percebe-se um abatimento no comportamento gráfico do material a partir do ponto 56 dias. Caso não houvesse abatimento da curva, o comportamento do agregado seria potencialmente reativo aos 120 dias de idade.

Analisando os prismas no decorrer das leituras nota-se que as eflorescências se espalharam totalmente em suas superfícies, ocorrendo um intenso manchamento. As fotografias apresentadas na Figura 82 registram as principais características observadas.



Agregado UHE Jaguari – Enrocamento  
Ensaio a 60° C



Agregado ped. Sta. Isabel  
Ensaio a 60° C

Figura 82 – Vista geral dos prismas de concreto com espalhamento de eflorescências na superfície - 6 meses.

A variação dos pesos dos prismas submetidos à temperatura de 60°C segue apresentada na Figura 83

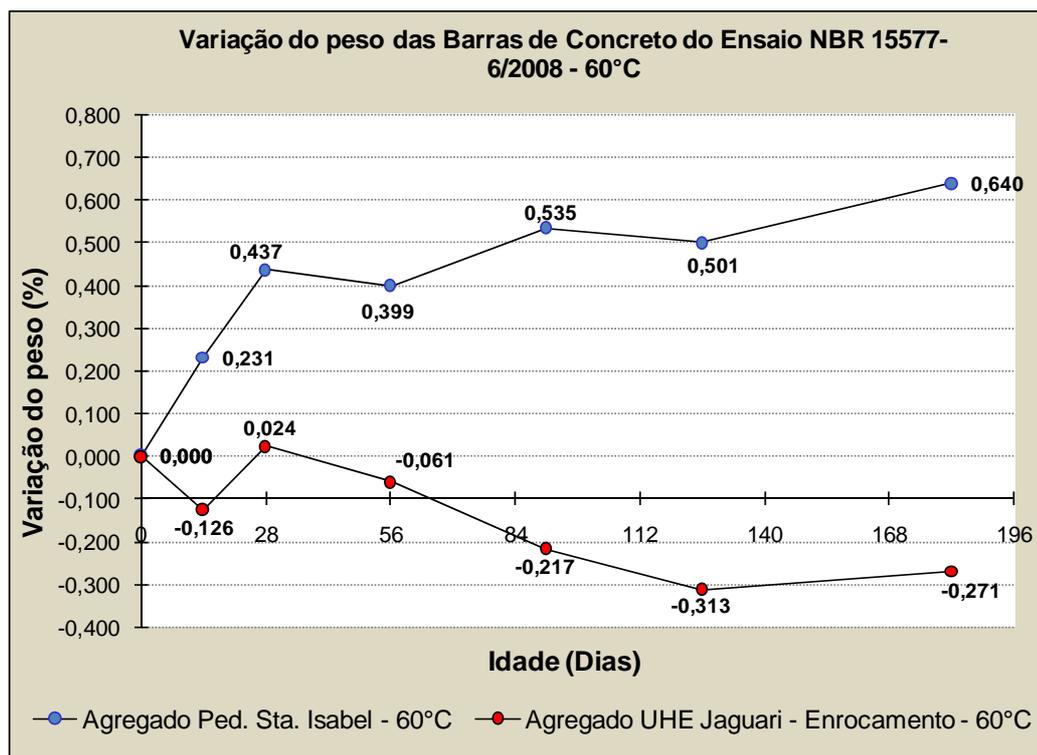


Figura 83 – Variação dos pesos das barras de concreto expostas ao ensaio NBR 15577 – 6 submetidos à temperatura de 60°C

Nota-se um ganho de peso para os prismas confeccionados com o agregado da pedra comercial Sta. Isabel, alcançando o valor de 0,640%. Já para os prismas confeccionados com o agregado coletado do enrocamento da barragem houve uma perda de peso chegando a 0,271% aos 180 dias de idade.

O provável aumento nos pesos dos prismas de concreto confeccionados com o agregado da pedra Sta. Isabel, não deve ser única e exclusivamente ao efeito da absorção de água e entumescimento dos poros, mas sim a um efeito combinado da saturação do concreto e sorção do gel formado já existente (HASPARYK, 2005), visto o alto valor de expansão que esse material alcançou. Já para o concreto confeccionado com agregado do enrocamento que não apresentou comportamento reativo a 60°C, houve perda de peso, indicando que a lixiviação de  $\text{CaOH}_2$  foi maior que a absorção de água no decorrer das leituras.

### 5.3.3. Ensaio de flexão nos prismas de concreto do ensaio acelerado (NBR 15577-6)

A Tabela 20 apresenta os resultados do ensaio de tração na flexão dos prismas de concreto submetidos à condição de exposição da NBR 15577-6/08.

De acordo com Neville (1997, p. 588), a tensão de tração teórica máxima atingida na borda inferior do prisma é denominada *módulo de ruptura*. Segundo o autor, o módulo de ruptura superestima a resistência à tração do concreto, e que o valor correto da resistência à tração é igual a cerca de  $\frac{3}{4}$  do módulo de ruptura teórico.

Tabela 20 – Resultados do ensaio de tração na flexão dos prismas de concreto

Procedência	Módulo de ruptura teórico (MPa)	$\frac{3}{4}$ do Módulo de ruptura (MPa)	Tensão Média de tração na flexão (MPa)
Enrocamento UHE Jaguari - 40°C	5,21	3,91	3,91
Enrocamento UHE Jaguari - 60°C	3,71	2,78	2,62
	3,75	2,81	
	3,03	2,27	
Ped. Sta. Isabel – 60°C	4,08	3,06	3,05
	4,35	3,26	
	3,78	2,84	

Segundo Scanduzzi e Andriolo (1986, p.408), a relação média entre os valores de tração por flexão de vigas não armadas e de compressão axial, para as mesmas misturas, obtida dos estudos de concretos para a barragem de Água Vermelha, pertencente à CESP, foi de 0,75 para um coeficiente de variação de 20%. Já para os concretos da barragem de Itaipu o valor médio dessa relação foi de 0,82 para um coeficiente de variação de 25%.

Mehta e Monteiro (1994) *apud* Isaias (2005, p.628) mostram as relações entre as resistências à tração (tração direta e tração na flexão) e a resistência à compressão do concreto. Seguindo o exposto pelos autores tem-se para o concreto confeccionado com o agregado coletado do enrocamento da barragem e submetido à temperatura de 40°C, resistência à compressão da ordem de 28 MPa. Cabe lembrar que esse concreto foi confeccionado com cimento padrão preparado pela ABCP e com consumo de 420 kg/m<sup>3</sup>. Já para o concreto confeccionado com o mesmo agregado, porém submetido à temperatura de 60°C, essa resistência cai para 14 MPa, sendo essa queda de 50%, quando comparadas as duas temperaturas. Para o concreto confeccionado com agregado comercial da pedreira Sta. Isabel e armazenado à temperatura de 60°C, a resistência mostra-se na faixa de 20 MPa.

Os resultados da compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos, obtidos do concreto reconstituído em laboratório, utilizando agregado da pedreira Sta. Isabel, com consumo de cimento também de 420 kg/m<sup>3</sup>, aos 28 dias de idade mostram-se com valores da ordem de 25

MPa, que correlacionados com os valores propostos por Mehta e Monteiro (1994) *apud* Concreto (2005, p.628) indicam resistência de tração na flexão da ordem de 3,7 MPa.

Hasparyk (2005, p.87) moldou corpos-de-prova de concreto com o objetivo de realizar ensaios de expansão e de determinar suas propriedades. A dosagem do concreto empregado na confecção dos corpos-de-prova seguiu a especificação da ASTM C-1293/01, com consumo de cimento (padrão) de 420 kg/m<sup>3</sup> e relação água/cimento de 0,45. A pesquisadora obteve aos 180 dias valores de resistência à compressão em média de 36,17 MPa (é importante ressaltar a diferença no agregado usado) mantidos em câmara úmida, e de 29,90 MPa para a estocagem à temperatura de 40°C. Já os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 180 dias foram em média de 3,56 MPa para a estocagem em câmara úmida e de 2,58 MPa para ambientes com temperatura de 40°C.

#### 5.3.4. Ensaio Osipov

A Figura 88 apresenta os agregados antes e depois de expostos ao ensaio.



NÃO ENSAIADO



ENSAIADO

Agregado da pedreira comercial Sta. Isabel



NÃO ENSAIADO



ENSAIADO

Agregado coletado do enrocamento da UHE Jaguari



NÃO ENSAIADO

ENSAIADO

Testemunho de sondagem da rocha de fundação da TA

Figura 84 – Ensaio Osipov para os agregados em estudo

Em função da rapidez e simplicidade do procedimento, este método foi aplicado aos agregados em estudo, embora o ensaio seja apenas indicativo e não conclusivo, não revelou modificação expressiva que pudesse assegurar sua reatividade frente aos álcalis do cimento. Uma possível explicação seria o exposto por Vieira, Lacerda e Golik (1997). Os autores comentam que este método aplica-se particularmente a agregados que apresentam entre seus constituintes variedades de sílica amorfa ou criptocristalina como opala e calcedônia, sendo pouco sensível na detecção de outras fases como silicatos tensionados ou finos, como no presente caso, por exemplo.

### 5.3.5. Análise Petrográfica

#### ➤ Microscopia estereoscópica e óptica

As análises petrográficas foram feitas primeiramente ao olho nu e ao microscópio estereoscópico, em amostras de prismas de concreto confeccionados com agregado coletado do enrocamento da barragem (amostra: ERC – 38) e mantidos à temperatura de 40°C, bem como nos prismas mantidos à temperatura de 60° (amostra: ERC – 60), em prismas de concreto confeccionados com agregado da pedreira comercial Sta. Isabel (amostra: ISA – 60) mantidos à temperatura de 60°C, em testemunhos retirados da laje da Tomada d'água (amostra: LAJ), e barras de argamassa confeccionadas com o testemunho de sondagem retirado da rocha de fundação da TA (amostra: TS), sendo complementadas por observação de lâminas delgadas ao microscópio óptico de luz transmitida. Essas análises foram realizadas no laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland (RELATÓRIO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP, 2009).

- Aspectos estruturais e texturais do concreto

As principais características dos concretos, identificadas macroscopicamente e aos microscópios estereoscópico, encontram-se sintetizadas nos Quadros 4 e 5.

Quadro 4 – Análise macroscópica do concreto

Fonte: Relatório ABCP (2009)

Características		Amostras	
		118263 (ERC – 38)	118263 (ERC – 60)
ASPECTOS GERAIS	Cor da argamassa	Cinza	Cinza
	Distribuição dos constituintes	Normal - homogêneo	Normal - homogêneo
	Proporção dos constituintes	Pouco argamassado	Pouco argamassado
	Aderência argamassa/agregado graúdo	Boa	Boa
	Porosidade macroscópica	Normal com poros milimétricos e submilimétricos	Normal com poros milimétricos e submilimétricos
	Compacidade	Compacto	Compacto
	Adensamento	Bem adensado	Bem adensado
	Fratuamentos	Ausente	Ausente
ASPECTOS RELATIVOS À REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	Bordas de reação	Frequente (bordas suaves)	Raras (bordas suaves). Pontos com gel da RAA disseminados na argamassa
	Poros preenchidos	Poucos poros preenchidos por material branco e raros com material acicular	Frequentes poros preenchidos por material branco e gel da RAA gretado
	Microfissuras	Raras	Raras

Quadro 5 – Análise macroscópica do concreto

Fonte: Relatório ABCP (2009)

Características		Amostras	
		118267 (ISA – 60)	118271 (Laj)
ASPECTOS GERAIS	Cor da argamassa	Cinza	Cinza
	Distribuição dos constituintes	Normal - homogêneo	Normal - homogêneo
	Proporção dos constituintes	Pouco argamassado	Pouco argamassado
	Aderência argamassa/agregado graúdo	Boa	Boa
	Porosidade macroscópica	Normal com poros milimétricos e submilimétricos	Normal com poros milimétricos e submilimétricos
	Compacidade	Compacto	Compacto
	Adensamento	Bem adensado	Bem adensado
	Fratuamentos	Raros	Ausente
ASPECTOS RELATIVOS À REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO	Bordas de reação	Raras (bordas suaves). Pontos com gel da RAA disseminados na argamassa	Frequentes (bordas suaves). Pontos com gel da RAA disseminados na argamassa
	Poros preenchidos	Frequentes poros preenchidos por material branco e gel gretado da RAA	Frequentes poros preenchidos por material branco e gel gretado da RAA
	Microfissuras	Raras	Raras

De um modo geral, as características macroscópicas dos concretos, permitem inferir processos de dosagem e adensamento normais. A ausência de vazios de exsudação indica adensamento adequado, enquanto a distribuição regular dos agregados graúdos em meio à argamassa evidencia boa homogeneização das misturas.

As amostras apresentam argamassa de coloração cinza. Os agregados utilizados do tipo Gnaiss milonitizado são constituídos predominantemente por fragmentos angulosos com dimensões variadas (2,0 cm a 0,4 cm) ou eventualmente lamelares, como pode ser observado na Figura 85. Os concretos possuem porosidade média e os poros são predominantemente milimétricos.



Figura 85 – Aspecto geral do concreto no qual se observa a argamassa cinza, as dimensões variadas do agregado graúdo, a porosidade normal e boa qualidade da amostra (amostra: ERC – 38)

Fonte: Relatório ABCP (2009)

Com relação às evidências da reação álcali-agregado, observa-se a presença de suaves bordas de reação ao redor dos agregados graúdos (Figura 86), nos concretos (ERC – 60, ISA – 60, e LAJ) ocorre gel disseminado na argamassa e na superfície de descolamento do agregado graúdo (Figura 87).

Em todos os concretos observam-se poros preenchidos por um material branco e, com exceção do concreto ERC – 38, nota-se também, a presença de gel gretado da RAA (Figura 88).

Em todas as amostras não foram observadas fissurações expressivas do concreto e do agregado.



Figura 86 – Aspecto geral do concreto – Amostra: ERC – 38. Observa-se bordas de reação álcali-agregado (RAA) envolvendo o agregado graúdo

Fonte: Relatório ABCP (2009)



Figura 87 – Aspecto geral do concreto – Amostra: ISA – 60. Observa-se gel da RAA na superfície de descolamento do agregado graúdo e na argamassa

Fonte: Relatório ABCP (2009)



Figura 88 – Aspecto geral do concreto – Amostra: ERC – 60. Observa-se material branco depositado na superfície de descolamento do agregado graúdo da argamassa

Fonte: Relatório ABCP (2009)

- Aspectos estruturais e texturais da Argamassa – Barra TS

De um modo geral, as características macroscópicas da argamassa, permitem inferir processos de dosagem e adensamento normais. A argamassa apresenta coloração cinza, a distribuição do agregado miúdo é homogêneo, porosidade normal (poros submilimétricos) e bom adensamento. Não se observam evidências de fraturamento, nem bordas de reação álcali-agregado e raros poros preenchidos por material branco.

- Análise petrográfica dos concretos

Ao microscópio óptico nota-se a presença de microfissuras na argamassa e no agregado e poros em todas as amostras (Figura 89), alguns com material submicroscópico depositado, além de preenchido por possível etringita, nas amostras: ERC – 38, ERC – 60, ISA – 60, LAJ e TS (Figura 88).

Em todos os concretos foram observadas finas bordas, porém nota-se que o material neoformado foi arrancado (possivelmente durante a preparação da lâmina petrográfica) ficando apenas algumas evidências, como discretas bordas.

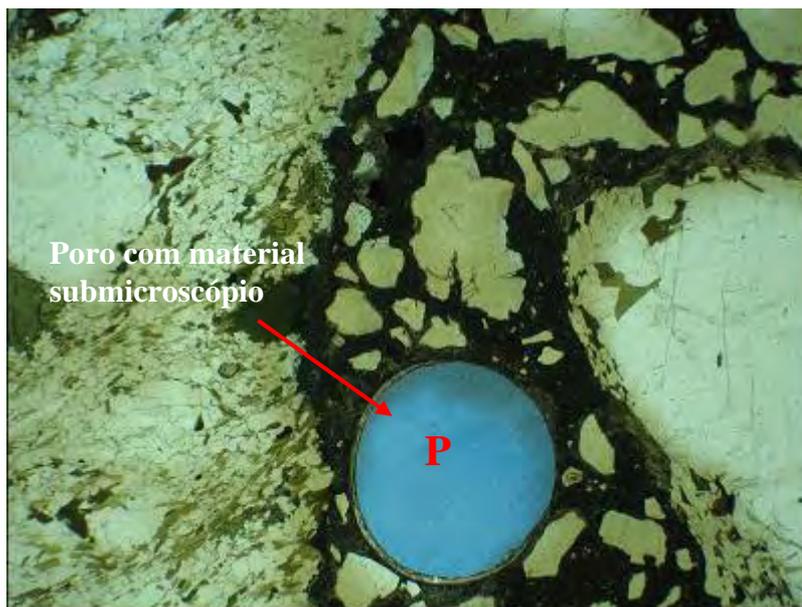


Figura 89 – Aspecto do concreto no qual se observa poro (P) com depósito de material submicroscópico (amostra: ERC – 60). Microscópio de luz transmitida. Nicóis paralelos. Ampliação 40x.

Fonte: Relatório ABCP (2009)

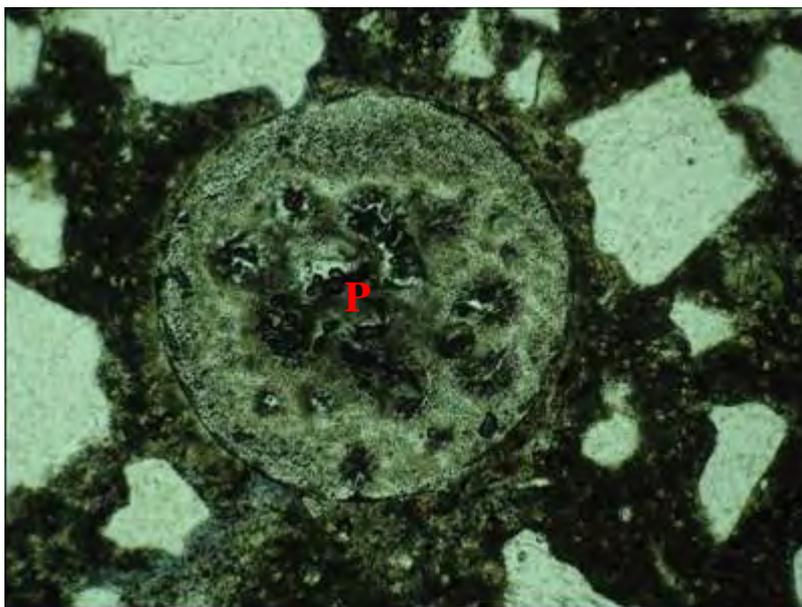


Figura 90 – Aspecto do concreto no qual se observa poro (P) preenchido por etringita. (Amostra: ISA – 60). Microscópio de luz transmitida. Nicóis paralelos. Ampliação 40x.

Fonte: Relatório ABCP (2009)

- Análise dos Agregados

Os concretos estudados são compostos por agregados do tipo pedra britada e areia artificial. Os Quadros 6 e 7 apresentam as características macroscópicas gerais do agregado.

Quadro 6 – Características gerais dos agregados graúdos

Fonte: Relatório ABCP (2009)

Características		Amostras	
		118263 (ERC – 38)	118264 (ERC – 60)
Tipo		Pedra britada	Pedra britada
Cor		Róseo com faixas escuras e claras	Cinza esbranquiçado com faixas escuras
Forma		Equidimensional	Equidimensional
Grau de arredondamento		Angulosos	Angulosos
Dimensão	Intervalo de variação	0,5 cm – 2,0 cm	0,4 cm – 2,0 cm
	Dimensão média	1,0 cm	1,0 cm
	Friabilidade	Não friável	Não friável
Caracterização físico-mecânica	Compacidade	Compacto	Compacto
	Tenacidade (resistência à quebra)	Elevada	Elevada

Quadro 7 – Características gerais dos agregados graúdos

Fonte: Relatório ABCP (2009)

Características		Amostras	
		118267 (ISA – 60)	118271 (Laj)
Tipo		Pedra britada	Pedra britada
Cor		Cinza esbranquiçado com faixas escuras e claras	Cinza esbranquiçado com faixas escuras e claras
Forma		Equidimensional	Equidimensional
Grau de arredondamento		Angulosos	Angulosos
Dimensão	Intervalo de variação	0,5 cm – 2,0 cm	0,4 cm – 2,0 cm
	Dimensão média	1,0 cm	1,0 cm
	Friabilidade	Não friável	Não friável
Caracterização físico-mecânica	Compacidade	Compacto	Compacto
	Tenacidade (resistência à quebra)	Elevada	Elevada

Os Quadros 8 e 10 apresentam as descrições petrográficas, feitas ao microscópio óptico de luz transmitida, dos agregados graúdos predominante nos concretos.

Quadro 8 – Síntese das características petrográficas dos agregados graúdos

Fonte: Relatório ABCP (2009)

Características microscópicas		Amostras	
		118263 (ERC – 38)	118264 (ERC – 60)
Mineralogia	Principal	Quartzo e feldspato (Plagioclásio e microlínio)	Quartzo e feldspato (Plagioclásio e microlínio)
	Subordinada	Biotita, hornblenda, alanita, clorita, sericita, titanita e opacos	Biotita, hornblenda, clorita, sericita, titanita e opacos
	Reativa/Deletéria	Quartzo deformado, com extinção ondulante (maior que 30°, >5% da amostra), quartzo microcristalino (1-5% da amostra) e feldspato alterado - >5%	Quartzo deformado, com extinção ondulante (maior que 30°, >5% da amostra), quartzo microcristalino (1-5% da amostra) e feldspato alterado - >5%
Estrutura		Foliada	Foliada
Textura		Granolepdoblástica	Granolepdoblástica
Granulação		Média	Média
Feldspatos (mirmequitas e pertitas)		Presentes (1-5%)	Presentes (1-5%)
Alteração		Medianamente alterada (feldspatos sericitizados e biotitas cloritizadas)	Medianamente alterada (feldspatos)
Deformação do Agregado		Quartzo deformado com ângulo de extinção ondulante maior que 30°, estiramento dos minerais segundo a orientação preferencial da rocha, sombras de pressão e pontos com quartzo tendendo a poligonização, indicando a recristalização da amostra	Quartzo deformado com ângulo de extinção ondulante maior que 30°, estiramento dos minerais segundo a orientação preferencial da rocha, sombras de pressão e pontos com quartzo tendendo a poligonização, indicando a recristalização da amostra
Tipo de rocha		Metamórfica	Metamórfica
Classificação Petrográfica		Gnaiss milonitizado	Gnaiss milonitizado
Reatividade Potencial		Agregado potencialmente reativo	Agregado potencialmente reativo

Os Quadros 9 e 11 trazem os resultados das análises dos agregados miúdos dos concretos estudados.

Quadro 9 – Síntese das características dos agregados miúdos

Fonte: Relatório ABCP (2009)

		Amostras	
		118263 (ERC – 38)	118264 (ERC – 60)
Grau de Arredondamento		Subanguloso a anguloso	Subanguloso a anguloso
Impregnações		Raras impregnações argilosas nos feldspatos e ferruginosos nos quartzos	Raras impregnações argilosas nos feldspatos e ferruginosos nos quartzos
Mineralogia	Principal	Quartzo e feldspato (Plagioclásio e microlínio)	Quartzo e feldspato (Plagioclásio e microlínio)
	Subordinada	Biotita, hornblenda, piroxênio, sericita, titanita e opacos	Biotita, hornblenda, piroxênio, sericita, titanita e opacos
Tipo/Origem		Areia artificial	Areia artificial
Alteração		Poucas nos feldspatos e nas micas	Poucas nos feldspatos e nas micas

Quadro 10 – Síntese das características petrográficas dos agregados graúdos

Fonte: Relatório ABCP (2009)

Características microscópicas		Amostras	
		118267 (ISA – 60)	118271 (Laj)
Mineralogia	Principal	Quartzo e feldspato (Plagioclásio e microlínio)	Quartzo e feldspato (Plagioclásio e microlínio)
	Subordinada	Biotita, hornblenda, piroxênio, sericita, titanita e opacos	Biotita, hornblenda, clorita, sericita, argilomineral, titanita e opacos
	Reativa/Deletéria	Quartzo deformado, com extinção ondulante (maior que 30°, >5% da amostra), quartzo microcristalino (1-5% da amostra) e feldspato alterado - >5%	Quartzo deformado, com extinção ondulante (maior que 30°, >5% da amostra), quartzo microcristalino (1-5% da amostra) e feldspato alterado - >5%
Estrutura		Foliada	Foliada
Textura		Granolepdoblástica	Granolepdoblástica
Granulação		Média	Média
Feldspatos (mirmequitas e pertitas)		Presentes (1-5%)	Presentes (1-5%)
Alteração		Medianamente alterada (feldspatos sericitizados, hornblenda alterada para argilomineral e biotitas cloritizadas)	Medianamente alterada (feldspatos sericitizados, hornblenda alterada para argilomineral e biotitas cloritizadas)
Deformação do Agregado		Quartzo deformado com ângulo de extinção ondulante maior que 30°, estiramento dos minerais segundo a orientação preferencial da rocha; minerais triturados formando massa de granulometria menor, bordejando cristais maiores e pontos com quartzo tendendo a poligonização, indicando a recristalização da amostra	Quartzo deformado com ângulo de extinção ondulante maior que 30°, estiramento dos minerais segundo a orientação preferencial da rocha; minerais triturados formando massa de granulometria menor, bordejando cristais maiores e pontos com quartzo tendendo a poligonização, indicando a recristalização da amostra
Tipo de rocha		Metamórfica	Metamórfica
Classificação Petrográfica		Gnaiss milonitizado	Gnaiss milonitizado
Reatividade Potencial		Agregado potencialmente reativo	Agregado potencialmente reativo

Quadro 11 – Síntese das características dos agregados miúdos

Fonte: Relatório ABCP (2009)

		Amostras	
		118267 (ISA – 60)	118271 (Laj)
Grau de Arredondamento		Subanguloso a anguloso	Subanguloso a anguloso
Impregnações		Raras impregnações argilosas nos feldspatos e ferruginosos nos quartzos	Raras impregnações argilosas nos feldspatos e ferruginosos nos quartzos
Mineralogia	Principal	Quartzo e feldspato (Plagioclásio e microlínio)	Quartzo e feldspato (Plagioclásio e microlínio)
	Subordinada	Biotita, hornblenda, piroxênio, sericita, titanita e opacos	Biotita, hornblenda, piroxênio, sericita, clorita, argilomineral, titanita e opacos
Tipo/Origem		Areia artificial	Areia artificial
Alteração		Poucas nos feldspatos e nas micas	Poucas nos feldspatos e nas micas

Do ponto de vista físico-mecânico, a alta tenacidade e a alteração incipiente de seus constituintes, permitem considerar os agregados utilizados nos concretos como de boa qualidade.

Do ponto de vista mineralógico, a deformação observada nos agregados graúdos pode favorecer o desencadeamento de reações expansivas do tipo álcali-silicato. O agregado graúdo foi classificado como Gnaisse Milonitizado (Figura 91), e foram considerados potencialmente reativos. Sua reatividade está relacionada principalmente à presença de quartzo microcristalino e feldspatos alterados, além do quartzo com extinção ondulante.

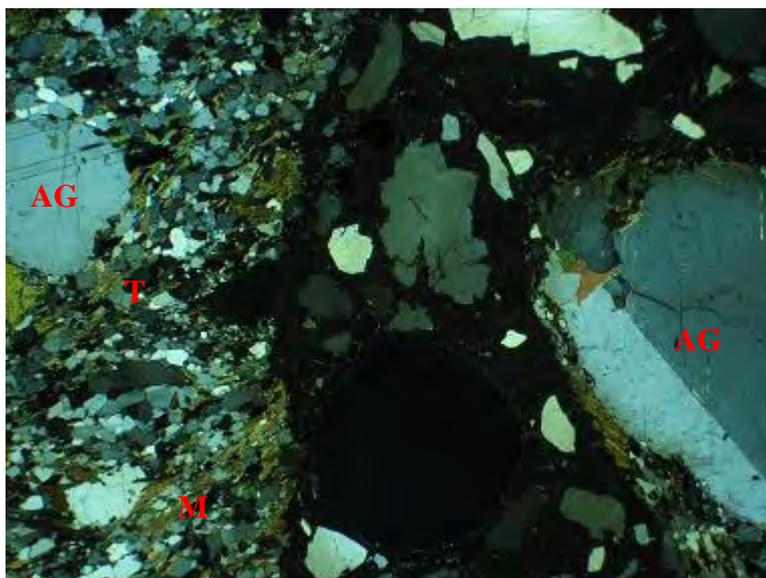


Figura 91 – Fotomicrografia do agregado graúdo (AG) no qual se observa minerais triturados (T) e orientação dos minerais (M). Microscópio de luz transmitida. Amostra: ERC – 60. Nicóis cruzados. Ampliação 10x.

Fonte: Relatório ABCP (2009)

- Análise petrográfica da areia

A avaliação das características petrográficas realizada ao microscópio estereoscópico de luz refletida (lupa), foi determinada na amostra após peneiramento a úmido na malha de 0,15mm para eliminação da porção argilosa. Os resultados obtidos estão sintetizados no quadro 12.

Quadro 12 – Síntese das características gerais da areia

Fonte: Relatório ABCP (2009)

<b>Amostra</b>		<b>118278 (PDA 6)</b>
Cor (seca)		Branco acinzentado
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Mica, fragmentos de rocha, turmalina, granada e opacos
	Deletéria	Quartzo microcristalinos (1-3%)
Grau de arredondamento		Subanguloso a anguloso
Grau de esfericidade		Baixa
Superfície dos grãos		Foscas
Alteração		Raras nas micas e feldspatos
Reatividade potencial		Potencialmente inócua

### 5.3.6. Classificação dos agregados estudados

A partir dos resultados realizados pode-se fazer uma tabela resumo contendo a reatividade dos agregados em relação ao período de análise.

Tabela 21 – Resumo da classificação reativa dos agregados de acordo com cada ensaio realizado

Agregados	ABNT NBR 15577-3	ABNT NBR 15577-4	ABNT NBR 15577-6		Osipov
			40°C	60°C	
Enrocamento – UHE Jaguari	Potencialmente reativo	Potencialmente inócua	Potencialmente inócua	Potencialmente inócua	Estudo complementar
Ped. Sta. Isabel	Potencialmente reativo	Potencialmente inócua	Potencialmente inócua	Potencialmente reativo	Estudo complementar
Testemunho de sondagem	Potencialmente inócua	Potencialmente inócua	-	-	Estudo complementar
Areia do porto extração Brasil	Potencialmente inócua	Potencialmente inócua	-	-	-
Areia do IPT	-	Potencialmente inócua	-	-	-

## 6. CONCLUSÕES

Para verificar a existência de Reação Álcali-Agregado e caracterizar o concreto da estrutura da Tomada d'água (TA) da UHE Jaguari, foram realizados diversos tipos de ensaios nos testemunhos extraídos da barragem: análise macroscópica, análise microscópica em microscópio estereoscópico de luz refletida e ensaios físicos em corpos-de-prova de argamassa e concreto. Também foram estudados agregados da região da usina (coletados do enrocamento da barragem, de pedreiras comerciais e testemunhos de sondagem da rocha de fundação da TA), bem como as características mecânicas de um concreto confeccionado em laboratório a partir da reconstituição do traço utilizado na construção da TA.

### ▪ Investigação dos testemunhos extraídos

Com relação aos aspectos gerais e relativos à reação álcali-agregado do concreto, a análise macroscópica nos testemunhos extraídos da estrutura da Tomada d'água revelou alta porosidade e deposições de materiais brancos preenchendo poros e vazios.

O estudo petrográfico e mineralógico realizado nos testemunhos extraídos do pilar do pórtico de carga da TA e da Laje da TA, realizado pela ABCP, confirmaram que os problemas de deformações e de fissuração excessiva observados na estrutura tiveram como causa principal a forte presença da reação álcali-agregado no concreto.

Assim, nota-se por toda a laje da TA, a presença de fissuras preenchidas por gel amorfo. O mesmo gel pôde ser observado preenchendo poros e vazios, visualizados pelo microscópio estereoscópico de luz refletida, em amostras de testemunhos retirados da laje da TA.

O ensaio de expansão residual realizado nos testemunhos extraídos da laje da TA ainda é muito recente, porém até a data analisada nota-se uma disponibilidade de expansão residual pequena. Comportamento diferente é percebido quando analisados os resultados dos três medidores triortogonais instalados na laje da TA. A instrumentação indica aberturas crescentes das fissuras no período de análise de oito anos.

A utilização das técnicas analíticas de difração de raios-X e espectroscopia de infravermelho permitiram a identificação de produtos típicos da RAA, formados através de suas diversas morfologias e composição química sílico-cálcico-alcálica, representando os produtos brancos depositados nos poros verificados através da análise visual, e constituindo

as fases cristalizadas. Adicionalmente, foram identificados os compostos etringita, produto que também pode ser expansivo, e silicato de cálcio hidratado, que por vezes, acham-se associados ao gel de reação álcali-agregado.

#### ▪ **Investigação do concreto reconstituído em laboratório**

A adaptação da metodologia para a reconstituição do traço de concreto a partir do método proposto pelo IPT de reconstituição de traço de argamassas permitiu a obtenção de um concreto reconstituído com proporções de materiais provavelmente próximas ao do concreto de referência (concreto do testemunho da Tomada d'água). Para a confirmação da metodologia e das hipóteses adotadas foram realizados no concreto reconstituído, os mesmos ensaios químicos feitos no testemunho, os quais mostraram boa correlação e confiabilidade.

O concreto reconstituído foi avaliado quanto às propriedades mecânicas e constatou-se resistência compatível com concretos elaborados para a mesma finalidade. A resistência à tração por compressão diametral apresentou-se dentro dos padrões esperados com resistência da ordem de 3 MPa, assim como a resistência à compressão de 23 MPa e módulo de elasticidade com 25 GPa.

No ensaio de permeabilidade o coeficiente encontrado para o concreto confeccionado foi de  $5,12 \times 10^{-11}$ , apresentando característica de concreto com baixa permeabilidade.

Conduto, os resultados da reconstituição do traço de concreto permitem o desenvolvimento de uma metodologia a ser normalizada pela ABNT.

#### ▪ **Investigação do agregado**

A precaução relacionada aos materiais ficou por conta de uma investigação dos componentes que foram utilizados no concreto, como o estudo da reatividade do agregado. Esse estudo mostrou que os agregados analisados não apresentaram potencialidade reativa nos quatro métodos estudados (NBR 15577-4 e NBR 15577-6 – à 40° e 60°C, e ensaio Osipov).

Pelos resultados encontrados nos ensaios da NBR 15577-4, o processo de reação álcali-agregado ainda se encontra em desenvolvimento, porém, a classificação imediata do agregado em um ensaio acelerado, nem sempre corresponde ao comportamento deste agregado em obra, em condições reais de exposição.

Pelo ensaio realizado em prismas de concreto pelo método da NBR 15577-6 à temperatura de 40°C, os agregados não apresentaram potencial expansivo. Quando analisado à temperatura de 60°C o agregado da pedreira Sta. Isabel apresentou uma curva de expansão alcançando o valor de 0,107%, comportamento não verificado para o agregado coletado do enrocamento, onde as expansões não passaram de 0,026%. O ensaio indicativo Osipov também não apresentou reatividade dos agregados frente aos álcalis.

Avaliou-se, também, a resistência à flexão dos prismas de concreto submetidos ao ensaio da NBR 15577-6 a 60°C e foram verificadas boas resistências quando correlacionadas às propriedades de tração na flexão e resistência à compressão, mesmo expostos a ambiente agressivo (umidade de 100% e temperatura de 60°C).

O único ensaio que mostrou a potencialidade reativa do agregado coletado do enrocamento da barragem e do agregado comercial da pedreira Sta. Isabel foi a análise petrográfica (ABNT – NBR 15577 – 3/08). Esse ensaio também foi realizado nos testemunhos de sondagem retirados da rocha de fundação da TA, indicando comportamento potencialmente inócuo do material, assim como para o agregado miúdo do porto de areia Extração Brasil.

Do ponto de vista mineralógico, os agregados do tipo gnaiss milonitizado apresentam características que podem favorecer o desencadeamento de reações expansivas do tipo álcali-silicato, reação esta que ocorre de uma forma mais lenta. A presença de quartzo com extinção ondulante maior que 30° e quartzo fino recristalizado, são feições que conferem ao agregado o caráter potencialmente reativo.

Notou-se nos prismas de concreto freqüente lixiviação com a precipitação de carbonato de cálcio nas superfícies, tanto à temperatura de 40°C quanto à temperatura de 60°C.

#### ▪ **Conclusões gerais**

O estudo de caso em questão que é a estrutura da Tomada d'água da UHE Jaguari tem comprovadamente a reação álcali-agregado instalada no concreto, como verificada pelas análises petrográficas dos testemunhos extraídos, pela inspeção visual e pelo monitoramento dos medidores triortogonais instalados na laje da TA. Porém, os métodos de ensaios disponíveis não são plenamente confiáveis para análise da reação deletéria, visto que os

agregados estudados (provenientes da própria usina e da região) não apresentaram potencial reativo nos ensaios realizados.

Constatou-se que o tipo litológico do agregado tem forte influência na detecção pelos métodos de ensaios, o que vem a ser um problema, pois pode fornecer informações errôneas com relação ao seu potencial reativo. Estudos mais aprofundados sobre o assunto são necessários.

Com relação ao estágio de expansão em que a Tomada d'água se encontra, é possível afirmar, de acordo com os resultados de expansão residual realizados nos testemunhos extraídos, que o comportamento da reação pode estar tanto no início da fase 2 (onde as taxas de expansão são aproximadamente constantes e pequenas), quanto na fase 4 de evolução da RAA (onde as taxas de expansões diminuem até se anular), como mostra a Figura 5 adaptada de Cyr e Carlos-Giberdes (2002). A locação da fase da RAA depende do tempo, que varia para cada obra. Geralmente para barragens as manifestações iniciais ocorrem depois dos dez primeiros anos. A UHE Jaguari foi construída há 35 anos atrás e os primeiros relatos de ocorrência da RAA surgiram 27 anos após sua conclusão. É importante ressaltar que os dados fornecidos pelos Medidores Triortogonais instalados na laje da estrutura mostram um comportamento crescente de aberturas das fissuras, indicando resultado inverso (evolução das expansões) aos encontrados pela expansão residual.

Análises com a instrumentação instalada na barragem, e análises laboratoriais deverão ocorrer periodicamente para verificar se não está havendo evolução no processo de reação deletéria e expansão com deslocamentos do concreto.

#### ➤ SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Faz-se a seguir algumas sugestões para os futuros trabalhos que serão desenvolvidos sobre esse tema.

- Mapeamento das fissuras existentes nas estruturas da UHE Jaguari para acompanhar a evolução das mesmas;
- Efetuar uma modelagem matemática para correlacionar as expansões medidas diretamente pela metodologia da NBR 15577-4 e as expansões estimadas pela análise matemática da estrutura;

- Análise das expansões dos ensaios de reatividade em idades superiores às realizadas nesta pesquisa (6 meses);
- Acompanhamento dos dados obtidos com a instrumentação da barragem, através da modelagem matemática, para serem correlacionados com os resultados dos ensaios laboratoriais realizadas nesta pesquisa;
- Estudos mais detalhados sobre a reconstituição de traços de concretos para tentar normalizar o procedimento.

## 7. REFERÊNCIAS

ALVES, E. F. R.; PIMENTA, M. A.; NASCIMENTO, O. L.; ANDRADE, W. P. Ensaios acelerados em testemunhos de concreto. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997. p.103-110.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C – 1260**: standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). West Conshohocken: [s.n.], 2001. p.647-650.

\_\_\_\_\_. **ASTM C.1293**: standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction. West Conshohocken: [s.n.], 2001. p.651-656.

ANDRIOLO, R. R.; SGARBOZA, B. C. **Inspeção e controle de qualidade do concreto**. São Paulo: Newswork: São Paulo, 1993. 570p.

ANDRIOLO, F. R. Observação de estruturas de concreto: validade quanto à ocorrência da reação álcali-agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNA/IBRACON, 1997. p.243-263.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 9p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003. 9p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10786**: concreto endurecido: determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 1989. 4p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577 – 2**: agregados - reatividade álcali-agregado: coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2008. parte 2, 2p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577 – 3**: agregados - reatividade álcali-agregado: análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro, 2008. parte 3, 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577 – 4**: agregados - reatividade álcali-agregado: determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008. - parte 4, 12p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577 – 6**: agregados - reatividade álcali-agregado: determinação da expansão em prismas de concreto. Rio de Janeiro, 2008. parte 6, 16p.

\_\_\_\_\_. **NBRNM 14**: materiais pozolânicos – determinação do teor de álcalis disponíveis. Rio de Janeiro, 1989. 11p.

\_\_\_\_\_. **NBRNM 25:** cimento portland – análise química – método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 1989. 9p.

\_\_\_\_\_. **NBRNM 55:** concreto – determinação da resistência à tração na flexão de corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1996. 5p.

BERNARDES, H. M. **Retroanálise do efeito estrutural das reações álcali-agregado em barragens de concreto.** 2000. 142 f. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

BÉRUBÉ, M. A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; RIVEST, M. Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity, **Cement and Concrete Research**, Elmsford, [s.n], v. 32, p. 1215–1227, 2002.

CASTRO, C. H.; GUERRA, E. A.; FONTOURA, J. T.; GRAÇA, N. G. Estudo comparativo de propriedades do concreto afetado pela reação álcali-agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. p. 45-51.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO – CESP. **Relatório de inspeção das estruturas de concreto UHE Jaguari.** São Paulo: Relatório interno CESP, 2000. 45p.

CHAPTER 11 – ARCH DAMS. **Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects.** Washington: Federal Energy Regulatory Commission. Division of Dam Safety and Inspections, 1999. Disponível em: <<http://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/guidelines/eng-guide/chap11.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2008.

CHARLWOOD, R. G.; SOLYMAR, Z. V. A review of alkali aggregate reactions in dams. **Dam Engineering**, Canada, v. 5, n. 2, Jul. 1994. p. 31-62.

COLLINS, C.; IDEKER, J.; WILLIS, G.; HURST, J. **Alkali-silica reaction the cancer of concrete.** [S.l.: s.n., 199-], Disponível em: <<http://www.ce.gatech.edu/~kkurtis/asr.ppt>>. Acesso em: 28 jul.de 2007.

COMPANHIA ENERGÉTICA DO ESTADO DE SÃO PAULO – CESP. **Perfil.** [S.l.: s.n., 199-]. Disponível em: <<http://www.cesp.com.br>>. Acesso em: 13 ago. 2006.

ISAIAS, G.C. (Ed.). **Concreto:** ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. 2v., 1600p.

CYR, M.; CARLES-GIBERGUES, A. Normalized age applied to AAR occurring in concretes with or without mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v.32, n.11, 2002. p.1771-1782.

DAL MOLIN, D. C. C. **Técnicas experimentais para estudo da microestrutura:** materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1, p.403-436.

DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms – 1: alkalis in cements and in concrete pore solutions. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v.5, n 12, p.329-245, 1975.

DUYOU LU; XIAOLING ZHOU; ZHONGZI XU; XIANGHUI LAN; MINGSHU TANG; FOURNIER, B. Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the three-gorges dam concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 36, [s.n.], p.1157-1165, 2006.

FOURNIER, B., CHEVRIER, R., DE GROSOBOIS, M., LISELLA, R., FOLLIARD, K., IDEKER, J., SHEHATAD, M., THOMAS, M., BAXTER, S. The accelerated concrete prism test (60°C): variability of the test method and proposed expansion limits. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12, 2004, Beijing. **Proceedings...** Beijing: International Academic Publishers e Beijing World Publishing Corporation, 2004. p.947-962.

GIACCIO, G.; ZERBINO, R.; PONCE, J. M.; BATIC, O. R. Mechanical behavior of concrete damaged by alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 38, p.993-1004, 2008.

GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. The chemistry of 'alkali-aggregate' reaction. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 11, n. 1, p.1-9, 1981.

GOULART NETO, A. A.; GALLETTI, A. A. B.; TORTORELLO, F. I.; HASPARYK, N. P. A.; GÓZ, R. S.; BITTENCOURT, R. M.; PACELLI, W. A. Metodologia para verificação da influência da RAA em estruturas de concreto no campo e no laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 1998. p.1-22. 1 CD ROM.

HASPARYK, N. P.; LOPES, A. N. M.; CAVALCANTI, A. J. C. T.; SILVEIRA, J. F. A. Deterioration index and properties of concretes from Paulo Afonso power plants – Brazil – affected by the alkali-aggregate reaction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 12., 2004, Beijing. **Proceedings...** Beijing: International Academic Publishers, 2004. v.2, p. 898-906.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HIDROSERVICE – ESPECIFICAÇÃO PARA OBRAS CIVIS. **Barragem e usina do Rio Jaguari**: especificação EC6.2 – obras de descarga – vertedouro – canal do vertedouro e bacia de dissipação. São Paulo: Relatório interno Hidroservice, 1967. 8p.

HOBBS, D. W. Cracking and expansion due to alkali-silica reaction: its effect on concrete. **Structural Engineering Review**, Toronto, v. 2, 1990. p.65-79.

HOYO, R. D.; GUTIERREZ, A. Safety assessment in concrete dams. In: DIX-HUITIÈME CONGRÈS DES GRANDS BARRAGES, I, 1994, Durban. **Anais...** França: [s.n.], 1994. p.499-509.

HUGHES, M. T.; CURTIS, D. D. **Life extension of concrete structures affected by an alkali-aggregate reaction at the mactaquac generating station – Hydro vision**

**mactaquac.** Canadá: [s.n.], 2001. 12p. Disponível em: <[http://www.hatchenergy.com/Company/Expertise/ExpHydroAAR/TechPapers/HydroVision\\_Mactaquac\\_2001.pdf](http://www.hatchenergy.com/Company/Expertise/ExpHydroAAR/TechPapers/HydroVision_Mactaquac_2001.pdf)>. Acesso em: 13 ago. 2006.

JONES, A. E.; CLARK, L. A. A review of the institution of structural engineers report: structural effects of alkali-silica reaction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 10, 1996, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: International Academic Publishers, 1996. p.394–401.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1., 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986. p.127-138.

KIHARA, Y.; NETO, C. S.; PECCHIO, M. Practical evaluation of IPR index forecasting ASR on granitic rocks. **IBRACON Materials Journal**, [s.l.] v. 2, n. 2, p. 91-96, 2006.

KOYANAGI, W.; ROKUGO, K.; UCHIDA, Y.; IWASE, H. Deformation behavior of reinforced concrete beams deteriorated by ASR. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 10., 1996, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: International Academic Publishers, 1996. p. 458–465.

KUPERMAN, S. C.; VIEIRA, S. R. S. S.; FERREIRA, W. V. F.; TIBA, R. Tentativa para determinação do término da reação álcali-agregado na estrutura de uma tomada d'água. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. p. 129-136.

KUPERMAN, S. C.; SALLES, F. M.; PÍNFAARI, J. C.; CARNEIRO, E. F. A Cesp e a detecção da reação álcali-agregado. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 26., Goiânia, 2005. **Anais...** Goiânia: CBGB, 2005. 12p.

LABORATÓRIO CESP DE ENGENHARIA CIVIL – CESP. **Instrumentação de obras civis.** São Paulo: São Paulo, 2006, 1p. Disponível em: <<http://www.cesp.com.br>>. Acesso em: 13 ago. 2006.

LEEMANN, A.; LOTHENBACH, B. The influence of potassium-sodium ratio in cement on concrete expansion due to alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 37, 2008. 7p.

MALISKA, A. M. **Microscopia eletrônica de varredura.** Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, [199-]. 98p. Disponível em:<[http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV\\_index.htm](http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV_index.htm)>. Acesso em: 15 set. 2007.

MARZOUK, H.; LANGDON, S. The effect of alkali-aggregate reactivity on the mechanical properties of high and normal strength concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 25, 2003, p.549-556.

MENDES, J. O. F. **Relatório do 3º estágio do aluno da faculdade de engenharia da Universidade do Porto.** Lisboa: Serviço de Barragens do L.N.E.C., 1962. 220p.

MONTEIRO, P. J. M. **CE 241 - Advanced concrete technology**. Berkeley: Department of Civil and Environmental Engineering-University of California at Berkeley, 2002. 32p. (Classroom notes).

MOSER, D. E. **Medidas múltiplas de características de barragens de concreto compactado com rolo utilizando instrumentação por fibra ótica**. 2006. 137f. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MUNHOZ, F. A.C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. 2007. 166 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NELSON, K. C. Or. **Cracking due to alkali-silica reaction and its effect on durability properties of concrete**. 1999. 186f. (Dissertação) – Department of Civil Engineering, University of Toronto, University of Toronto, Canada, 1999.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2.ed. São Paulo: Editora PINI, 1997. 828 p.

ORLOWSKI, E. A. G.; LACERDA, L. A.; YAMAUCHI, V. Metodologia para avaliação de instrumentação de barragens em concreto de pequeno porte. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2., 2003, Salvador. **Anais...** Salvador: Bahia, 2003. p.476-479.

OWSIK, Z. Alkali-aggregate reaction in concrete containing high-alkali cement and granite aggregate. **Cement and Concrete Research**, Austrália, v. 34, p.7-11, 2004.

PAPPALARDO JUNIOR, A. **Uma metodologia para a modelagem matemática de barragens de concreto afetadas pela reação álcali-agregado**. 1998. 181 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto**. 1981. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

PRISZKULNIK, S. **Reação alcali-agregado no concreto: causas, prevenção e possíveis terapias**. In: CONGRESSO DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – CONINFRA, 1., São Paulo, 2007. **Anais...** São Paulo: São Paulo, 2007. 49p. Disponível em:<[http://www.andit.org.br/coninfra\\_files/Artigos/01-78AR.pdf](http://www.andit.org.br/coninfra_files/Artigos/01-78AR.pdf)>. Acesso em: 30 Out. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Relatório de ensaio nº53594: gerência de tecnologia**. São Paulo: ABCP, 2009. 30p.

RIVARD, P.; BÉRUBÉ, M. A.; OLLIVIER, J. P.; BALLIVY, G. Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali–aggregate reactivity. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 33, p.1147-1153, 2003.

RODRIGUES, R. O. **Estudo sobre modelagem matemática de estruturas de concreto afetadas por reações álcali-agregado**. 2002. 257 f. Tese (Pós-Doutorado) – Faculdade de Engenharia, University of California at Berkeley – UCB, Berkeley, 2002. (Relatório de Pesquisa).

SABBAG, A. F. **Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto da UHE de Mascarenhas**. 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SALLES, F. M.; KUPERMAN, S. C.; BERTOLUCCI, L. D. V. Ensaio acelerado para verificação da RAA em prismas de concreto. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006. 13p. 1 CD ROM.

SANCHEZ, L. F. M. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos**. 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SAOUMA, V.; PEROTTI, L.: Alkali aggregate reactions in dams: stress analysis and long term predicions I. In: ASDSO DAM SAFETY CONFERENCE, 2005, Nova Orleans. **Anais...** Nova Orleans: USA, 2005. 19 p.

SAOUMA, V.; YUNPING XI. **Literature review of alkali aggregate reactions in concrete dams**. Colorad: Department of Civil, Environmental, & Architectural Engineering-University of Colorado. 2004. 82p. Disponível em:< <http://www.dam-analysis.com/AAR/ASR-SOA-V-4.pdf>>. Acesso em: 30 Out. 2007.

SARKAR, S. L.; MUKHOPADHYAY, A. K.; ZOLLINGER, D. G.; SEUNGWOOK, L. **Handbook for identification of alkali-silica reactivity in airfield pavements**. Washington: Department of Transportation, 2004. 79p. Disponível em:< <http://www.faa.gov/arp/150acs.cfm>>. Acesso em: 30 Out. 2007.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F. R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios**. São Paulo: PINI, 1986. 556p.

SHAYAN, A.; GRIMSTAD, J. Deterioration of concrete in a hydroelectric concrete gravity dam and its characterization. **Cement and Concrete Research**, Austrália, v. 36, p.371-383, 2006.

SIEMES, T.; VISSER, J. Low tensile strength older concrete structures with alkali-silica reaction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11, 2000, Quebec. **Proceedings...** Quebec: International Academic Publishers, 2000. p. 1029–1038.

SILVA, P. N. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo Paulo Afonso/CHESF: influência da reação nas propriedades do concreto**. 2007. 220 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto**. São Paulo: Oficina de textos, 2003. 317 p.

SMAOUI, N.; BÉRUBÉ, M. A.; FOURNIER, B.; BISSONNETTE, B.; DURAND, B. Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 35, 2005. p.203-212.

SWAMY, R.N; HAMADA, H; TANIKAWA, S; LAIW, J.C. **Influence of protective surface coating on the structural behavior of asr-affected rc beams under sustained loading.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION, 12, 2004, China. **Anais...** China: ICAAR, 2004. p.1235-1243.

TANG, M.; DENG, M.; XU, Z. Comparison between alkali-silica reaction and alkali-carbonate reaction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Canada. **Anais...** Quebec: ICAAR, 2000. p.109-118.

TELES, M.; BEGONHA, A.; FERNANDES, I. Estudo petrográfico de betões e argamassas. **Revista Internacional Construlink**, Portugal, v.2, n. 5, p.17, 2004.

THEMAG ENGENHARIA E GERENCIAMENTO. **Relatório de inspeção das estruturas de concreto:** relatório interno nº 6280-01-GL-420-RI-00002. Jaguari: UHE, 2000. 45p.

THOMAS, M.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J.; SHEHATA, M. Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v 36, p.1842-1856. 2006.

TIECHER, F.; DAL MOLIN, D. C. C. Método de ensaio da ASTM C 1260: avaliação das idades prescritas para o estabelecimento da potencialidade reativa dos agregados. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006. 9p. 1 CD ROM.

USINA HIDRELÉTRICA JAGUARI – COMPANHIA ENERGÉTICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Usina hidrelétrica Jaguari.** São Paulo: [s.n.], 2006. 1p. Disponível em: <<http://www.cesp.com.br>>. Acesso em: 13 ago. 2006.

VALDECIR, A. Q.; CINCOTTO, M. A. **Reconstituição de traço de argamassas:** atualização do método IPT. São Paulo: São Paulo, [200-]. 27p. (Boletins Técnicos Publicados, BT/PCC/207) Disponível em: <[http://publicacoes.pcc.usp.br/PDFs%20novos/BTs/BT207%20Valdecir\\_MariaAlba.pdf](http://publicacoes.pcc.usp.br/PDFs%20novos/BTs/BT207%20Valdecir_MariaAlba.pdf)>. Acesso em: 18 ago. 2008

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado:** mapeamento de agregados reativo do Estado de São Paulo. 2002. 213 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

VAN AARDT, J. H. P.; VISSER, S. Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 7, n.6, 1977. p.643-648.

VEIGA, F. N.; GONÇALVES, I. N.; ANDRADE, N. P. H. Microscopia eletrônica de varredura de géis provenientes de usinas hidrelétricas. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. p. 69-79.

VEIRA, S. R. S. S.; LACERDA, S. S.; GOLIK, M. A. Estudo da reatividade potencial dos materiais empregados nos concretos aplicados na obra Umpliação da Usina Rio do Peixe. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. p. 165-172.

ZOCOLOTTI FILHO, C. A. **Utilização de técnicas de poligonação de precisão para o monitoramento de pontos localizados em galerias de inspeção**: estudo de caso da U. H. de Salto Caxias. 2005. 112 f. (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

ZHANG, C., WANG, A., TANG, M., WU, B., ZHANG, N. Influence of Aggregate Size and Aggregate Size Grading on ASR Expansion. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v.29, p.1393-1396, 1999.

## APÊNDICE A – Caracterização dos Materiais – Resultados

- **Análises químicas dos materiais**

*a) Determinação dos álcalis totais e solúveis*

A análise química foi realizada em duas amostras de testemunhos retirados da laje da Tomada d'água (TA), sendo um dos testemunhos extraídos no ano 2000 (Test. 2000) e mantido em câmara úmida até a presente data e o outro extraído atualmente (laje TA). Além dos testemunhos, a análise química foi realizada em duas amostras de agregado coletada do enrocamento, no agregado comercial da pedreira Sta. Isabel e em testemunhos de sondagem da rocha de fundação da TA.

As determinações do teor de álcalis totais foram realizadas segundo especificações da norma de ensaio NBR NM 25/1989 – Cimento Portland: análise química – método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. A Tabela 22 apresenta os resultados das análises químicas dos materiais estudados.

Tabela 22 – Análises químicas de testemunhos extraídos e dos agregados

Ensaio	Resultados (% em massa)					
	Laje TA	Test. 2000	Agreg. 1. do enrocamento	Agreg. 2 do enrocamento	Pedreira Sta. Isabel	Test. sondagem
Perda ao fogo - PF	6,44	8,11	1,07	0,38	0,49	0,71
Dióxido de silício - SiO <sub>2</sub>	61,57	61,75	53,82	64,46	60,94	60,81
Óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,84	10,2	16,46	16,94	23,95	17,80
Óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,43	3,15	8,29	5,43	6,58	6,00
Óxido de cálcio - CaO	11,01	11,45	6,77	4,42	4,70	5,64
Óxido de magnésio - MgO	0,99	1,06	4,56	8,29	2,16	2,32
Óxido de sódio - Na <sub>2</sub> O - Solúvel	0,04	0,03	0,01	0,02	0,06	0,08
Óxido de potássio - K <sub>2</sub> O - Solúvel	0,04	0,02	0,01	0,01	0,004	0,01
Equivalente Alcalino - Solúvel	0,06	0,04	0,02	0,02	0,06	0,09
Óxido de sódio - Na <sub>2</sub> O - Total	0,19	0,09	0,12	0,38	0,06	0,09
Óxido de potássio - K <sub>2</sub> O - Total	0,24	0,12	0,12	0,12	1,61	1,48
Equivalente Alcalino - Total	0,35	0,17	0,20	0,46	1,12	1,07

*b) Caracterização mineralógica – Difração de raio-X*

As análises por difração de raios – X são importantes para a identificação das fases presentes, tanto dos minerais já existentes, auxiliando na caracterização petrográfica da rocha como dos produtos cristalinos neoformados a partir da reação deletérea (SILVEIRA, 2006).

As análises por difração foram realizadas em testemunhos de concreto e agregados com o objetivo de identificar os constituintes do material e a possível presença de produtos deletérios. A amostragem foi realizada nos concretos que apresentaram visualmente características mais expressivas de algum tipo de processo de deterioração. A metodologia de preparação adotada foi a do pó não orientado, sendo identificados os constituintes mineralógicos presentes nas frações menores do que 38 µm.

A análise nos testemunhos permitiu a identificação de minerais provenientes do agregado, como o quartzo (SiO<sub>2</sub>), o potassicpargasite (KCa<sub>2</sub>(Mg<sub>3</sub>FeAl)(Si<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>)O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub>), a cristobalita e compostos provenientes da pasta de cimento como a etringita e o silicato de cálcio hidratado.

Já no agregado gnáissico os minerais provenientes foram o quartzo, a biotita, o potassicpargasite (KCa<sub>2</sub>(Mg<sub>3</sub>FeAl)(Si<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>)O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub>), microclínio (K Al Si<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) e compostos formados por *Potassium Cobalt Aluminum Silicate Hydroxide* – K Co<sub>3</sub> Al Si<sub>3</sub> O<sub>10</sub> (OH)<sub>2</sub>

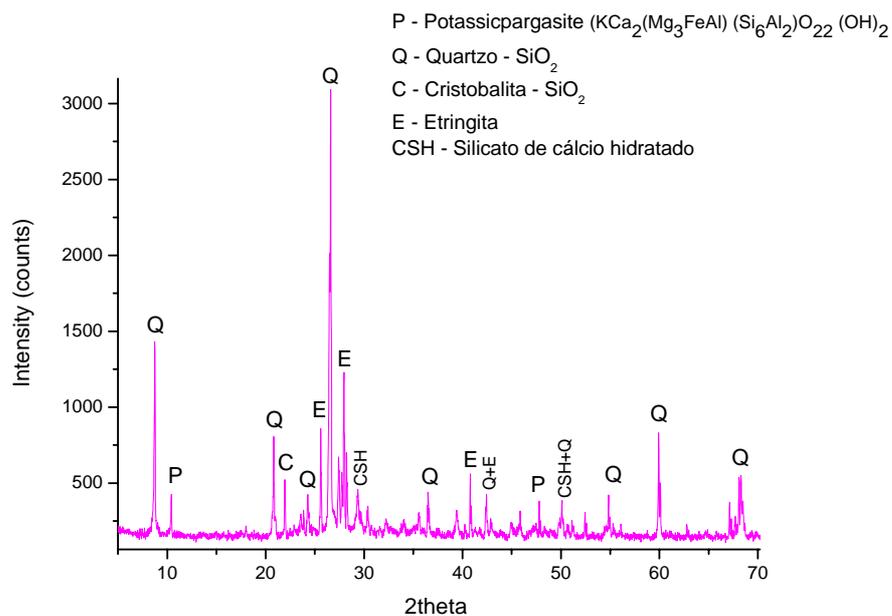


Figura 92 – Difratoograma de raios-X de testemunho extraído em 2007 da Laje da TA

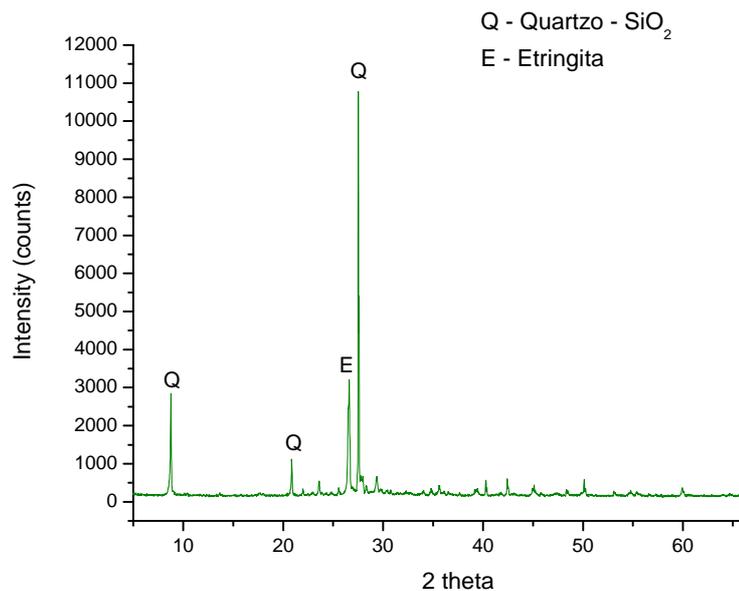


Figura 93 – Difratoograma de raios-X de testemunho extraído da laje da TA no ano 2000

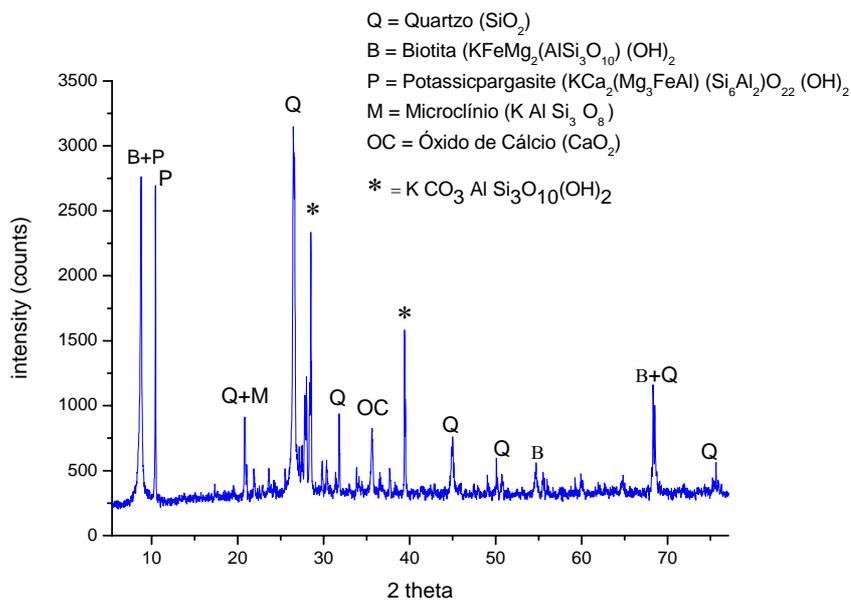


Figura 94 – Difratoograma de raios-X do agregado 1 coletado do enrocamento

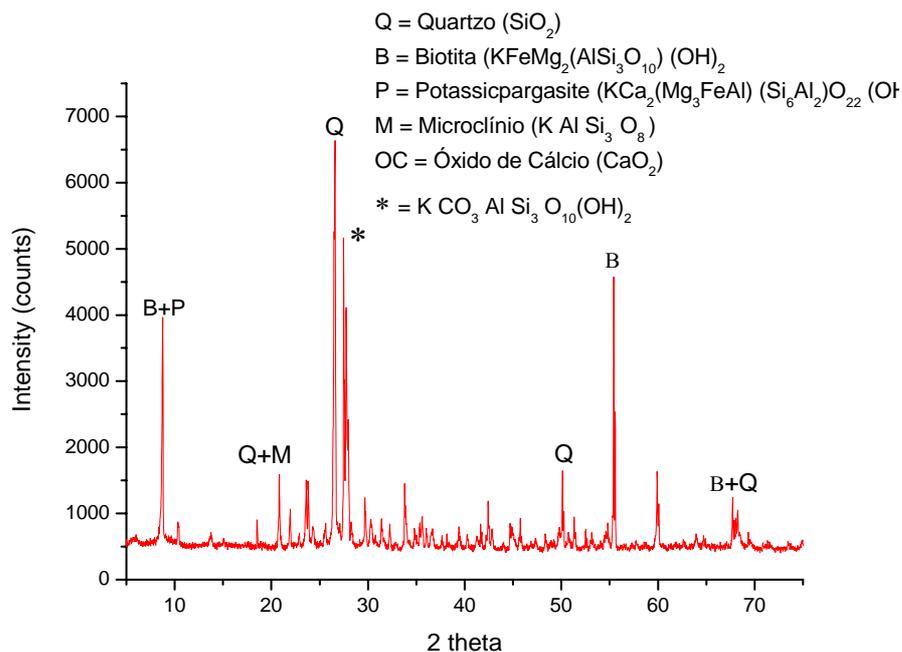


Figura 95 – Difratoograma de raios-X do agregado 2 coletado do enrocamento

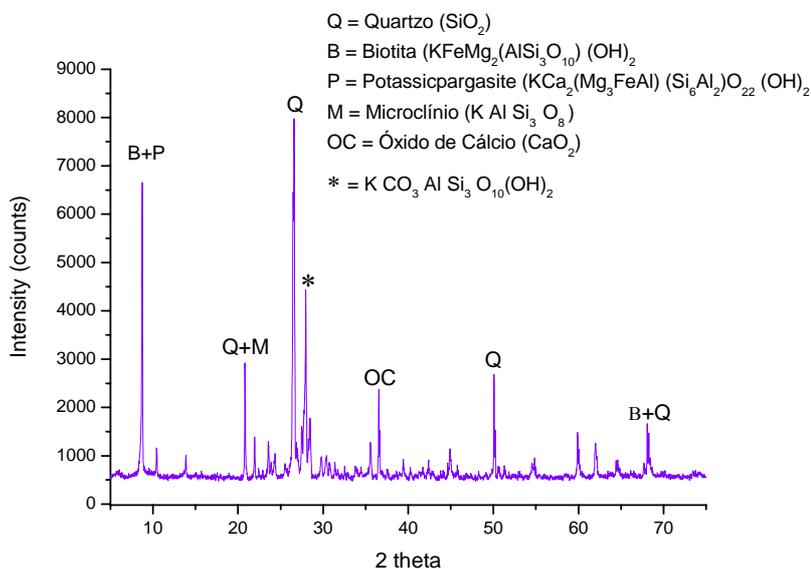


Figura 96 – Difratoograma de raios-X do agregado coletado da pedra comercial Sta. Isabel

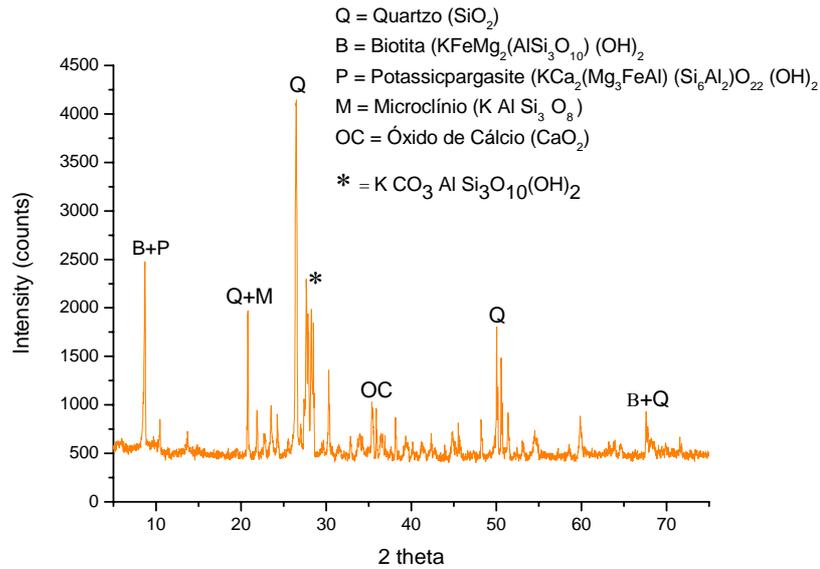


Figura 97 – Difratoograma de raios-X de testemunhos de sondagem extraídos da rocha de fundação da TA

c) *Caracterização mineralógica – Infravermelho*

Para a espectroscopia de infravermelho, os materiais (agregado e testemunhos) foram fragmentados, sendo selecionadas as suas porções internas, e o pó resultante da moagem passante na peneira de abertura 38 µm.

As amostras previamente preparadas (cerca de 1mg) foram maceradas conjuntamente com brometo de potássio (KBr) seco. Em seguida, todo o material foi transferido para um pastilhador e compactadas a uma carga de 2 toneladas, para a obtenção de uma pastilha transparente com 13mm de diâmetro.

Os ensaios foram realizados em testemunhos extraídos no ano 2000 e em testemunhos extraídos em ano de 2007, tendo como objetivo comparar as características mineralógicas da amostra em função do tempo, assim como no agregado coletado do enrocamento da barragem.

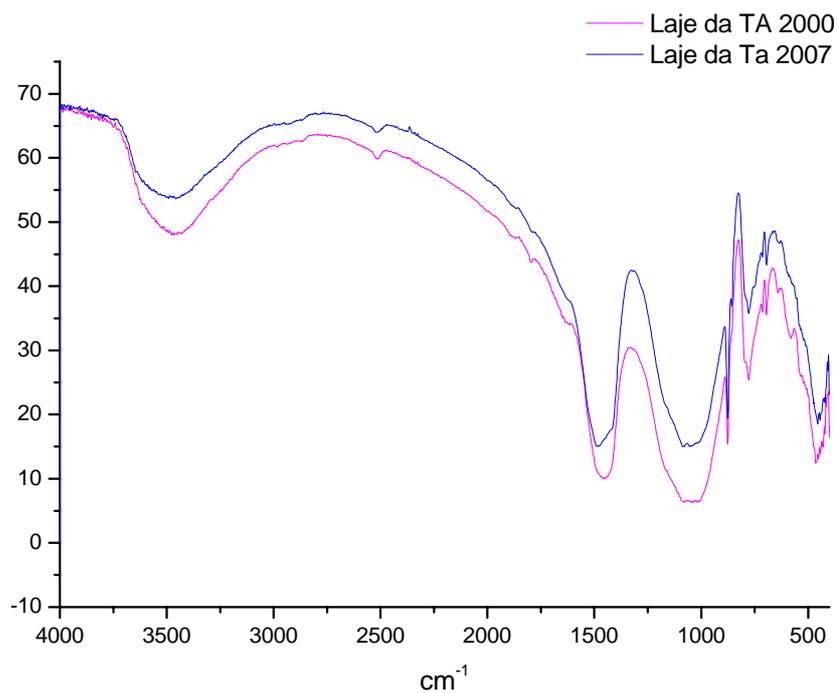


Figura 98 – Espectro de transmitância de infravermelho em testemunhos de concreto extraídos da Laje da TA no ano 2000 e no ano de 2007

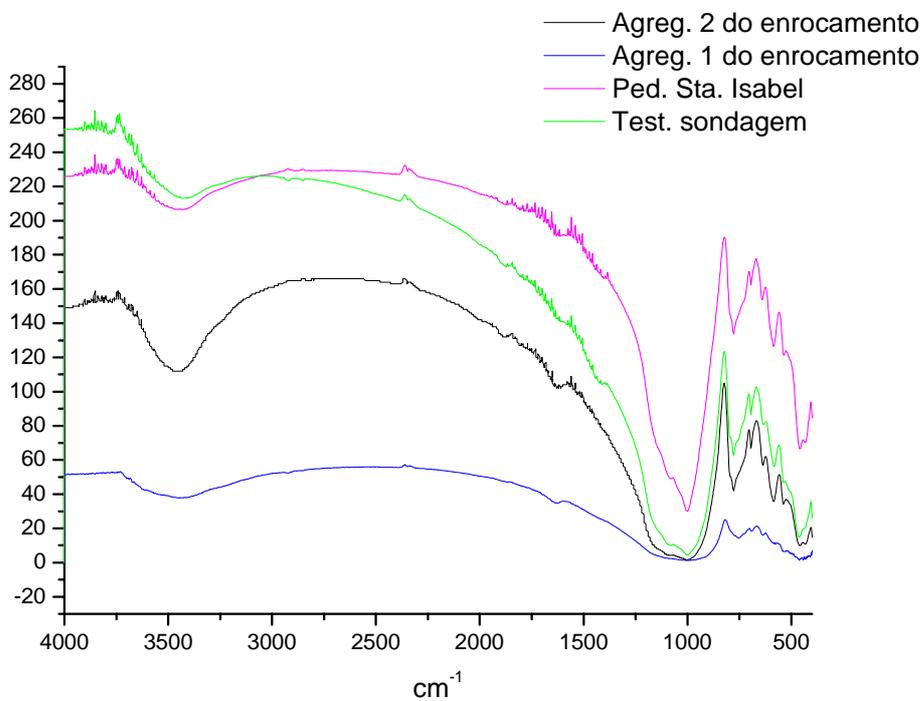


Figura 99 – Espectro de transmitância de infravermelho em agregados coletados do enrocamento da barragem, agregado de pedra comercial e testemunhos de sondagem da rocha de fundação.

Segundo interpretações de bandas obtidas por Hasparyk (2005) foi possível analisar as bandas relativas aos dois espectros estudados (Testemunho da Laje retirado em 2000 e testemunho da Laje retirado em 2007). Suas prováveis atribuições foram:

- 2300 a 3600  $\text{cm}^{-1}$ : vibração de estiramento de X-OH (X=Si, H), atribuída ao OH;
- 1642 a 1660  $\text{cm}^{-1}$ : banda gerada pela vibração de deformação da água ( $\text{H}_2\text{O}$ );
- 1037  $\text{cm}^{-1}$ : vibração de estiramento simétrico da ligação Si-O;
- 457 e 600  $\text{cm}^{-1}$ : banda gerada pela vibração de deformação da ligação O-Si-O;
- 470  $\text{cm}^{-1}$ : banda causada pela vibração do ânion  $\text{CO}_3^{-2}$  (carbonatos); 783  $\text{cm}^{-1}$ :
- vibração de estiramento simétrico da ligação O-Si-O;

Para as bandas relativas ao agregado, o espectro analisado identificou:

- 2300 a 3600  $\text{cm}^{-1}$ : vibração de estiramento de X-OH (X=Si, H), atribuída ao OH;
- 953  $\text{cm}^{-1}$ : vibração de estiramento do Si-O- $\text{X}^+$  (X=íons alcalinos como K e Na);
- 1037  $\text{cm}^{-1}$ : vibração de estiramento simétrico da ligação Si-O.

### • Caracterização dos Agregados

#### *Areia padrão IPT*

Massa unitária em estado compactado seco (NBR 7810)	1,616 (g/cm <sup>3</sup> )
-----------------------------------------------------	----------------------------

#### *Areia comercial porto Areia Brasil – Jacarei –SP*

Massa Específica S.S.S	2,611(g/cm <sup>3</sup> )
Massa Específica Seca	2,625(g/cm <sup>3</sup> )
Massa Específica Aparente	2,603 (g/cm <sup>3</sup> )
Absorção	0,32 %
Massa Unitária no estado compactado seco (NBR 7810)	1,629 (g/cm <sup>3</sup> )

#### *Agregado da UHE Jaguari (enrocamento)*

Massa Específica S.S.S	2,751 (g/cm <sup>3</sup> )
Massa Específica Seca	2,740 (g/cm <sup>3</sup> )
Massa Específica Aparente	2,770 (g/cm <sup>3</sup> )
Absorção	0,38 %
Massa Unitária no estado compactado seco (NBR 7810)	1,590 (g/cm <sup>3</sup> )

***Agregado Comercial da Pedreira Santa Isabel – SP***

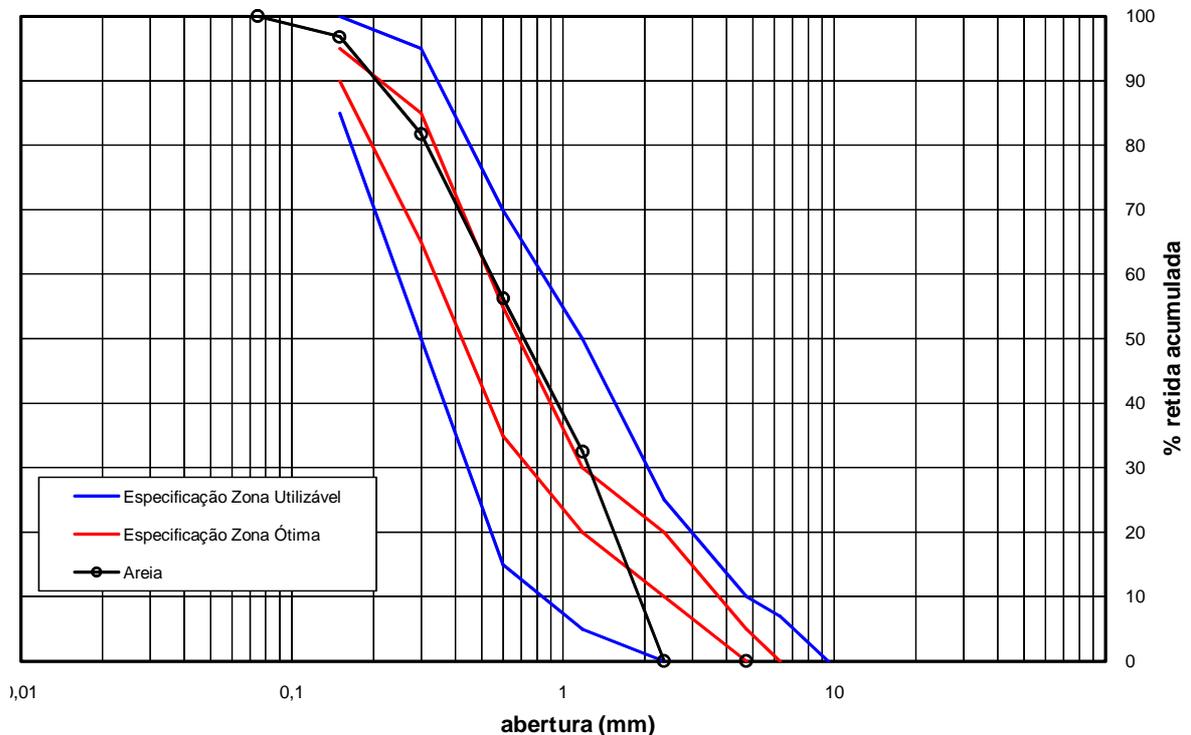
Massa Específica S.S.S	2,733 (g/cm <sup>3</sup> )
Massa Específica Seca	2,712 (g/cm <sup>3</sup> )
Massa Específica Aparente	2,770 (g/cm <sup>3</sup> )
Absorção	0,77 %
Massa Unitária no estado compactado seco (NBR 7810)	1,565 (g/cm <sup>3</sup> )

• **Curvas Granulométricas dos Agregados**

<b>Obra :</b> Estudos Interlaboratorial - Progma 449	<b>Carta n.º:</b>
<b>Procedência:</b> IPT	<b>O. S. n.º:</b>
<b>Identificação:</b> Areia Natural Lavada	<b>Data ensaio:</b> 31/03/2008

PENEIRAS		Abertura	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
Normal	Auxiliar					
3"	-	75 mm		0,0	0,0	
-	2 1/2"	63 mm		0,0		0,0
-	2"	50 mm		0,0		0,0
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0	
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0		0,0
-	1"	25 mm		0,0		0,0
3/4"	-	19 mm		0,0	0,0	
-	1/2"	12,5 mm		0,0		0,0
3/8"	-	9,5 mm		0,0	0,0	
-	1/4"	6,3 mm		0,0		0,0
N.º 4	-	4,75 mm		0,0	0,0	
N.º 8	-	2,36 mm		0,0	0,0	
N.º 16	-	1,18 mm	389,2	32,5	32,5	
N.º 30	-	600 µm	284,6	23,8	56,3	
N.º 50	-	300 µm	304,9	25,5	81,8	
N.º 100	-	150 µm	180,9	15,1	96,9	
fundo	-	75 µm	37,5	3,1		100,0
Total			1197,1	100,0	267,4	

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm) →	0,075	0,150	0,300	0,600	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5	12,5	19	25
Areia	100,0	96,9	81,8	56,3	32,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



φ máx. (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária		absorção (%)	pulverulento (%)	matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)	solta (g/cm³)	4% de umidade (g/cm³)			
2,33	2,67	2,604	2,610	2,600	-	-	0,16	-	-

**CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO**

<b>Obra :</b> Programa CESP/Anell - P&D - Programa Ensaio 449	<b>Carta n.º:</b>
<b>Procedência:</b> Pedreira Santa Isabel - SP	<b>O. S. n.º:</b>
<b>Identificação:</b> Brita 1 - Gnaiss	<b>Data ensaio:</b> 20/03/2008

PENEIRAS		Abertura (mm)	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
Normal	Auxil.					
3"	-	75 mm		0,0	0,0	
-	2 1/2"	63 mm		0,0		0,0
-	2"	50 mm		0,0		0,0
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0	
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0		0,0
-	1"	25 mm		0,0		0,0
3/4"	-	19 mm	725	3,6	3,6	
-	1/2"	12,5 mm	9050	45,0		48,6
3/8"	-	9,5 mm	6825	33,9	82,5	
-	1/4"	6,3 mm	2325	11,6		94,0
N.º 4	-	4,75 mm	325	1,6	95,7	
N.º 8	-	2,36 mm	875	4,3	100,0	
N.º 16	-	1,18 mm		0,0	100,0	
N.º 30	-	600 µm		0,0	100,0	
N.º 50	-	300 µm		0,0	100,0	
N.º 100	-	150 µm		0,0	100,0	
fundo	-	75 µm		0,0		100,0
Total			20125	100,00	681,74	

Peneiras	% Retida Acumulada												
(mm) →	0,150	0,300	0,600	1,180	2,36	4,75	6,30	9,50	12,50	19,0	25,0	31,5	
Brita	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,7	94,0	82,5	48,6	3,6	0,0	0,0	



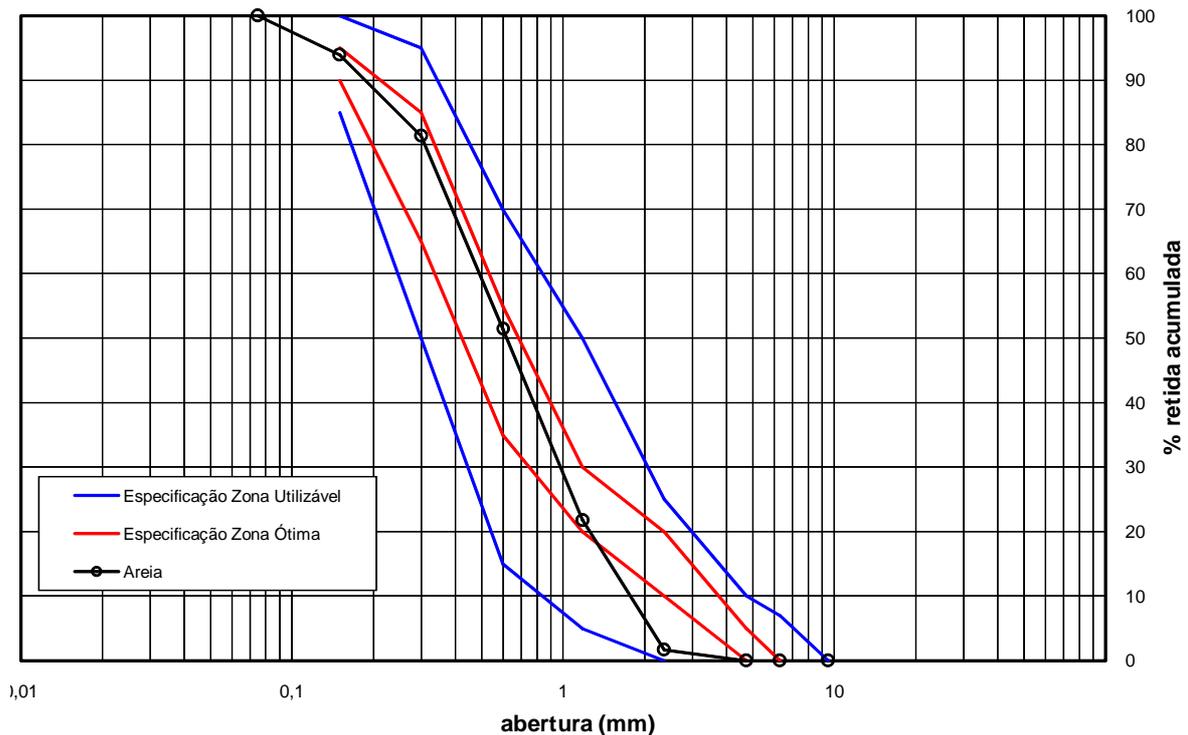
φ máximo (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária (g/cm³)	absorção (%)	pulverulento (%)
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)			
25,0	6,82	2,733	2,712	2,770	1,474	0,77	0,52

**CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO**

<b>Obra :</b> Programa CESP/Anel - P&D - Programa Ensaio 449	<b>Carta n.º:</b>
<b>Procedência:</b> Porto Brasil - Extração de Areia - Jacarei -SP	<b>O. S. n.º:</b>
<b>Identificação:</b> Areia natural	<b>Data ensaio:</b> 28/03/2008

PENEIRAS		Abertura	Peso Retido (g)	% Retida	% Retida Acumulada	
Normal	Auxiliar					
3"	-	75 mm		0,0	0,0	
-	2 1/2"	63 mm		0,0		0,0
-	2"	50 mm		0,0		0,0
1 1/2"	-	37,5 mm		0,0	0,0	
-	1 1/4"	31,5 mm		0,0		0,0
-	1"	25 mm		0,0		0,0
3/4"	-	19 mm		0,0	0,0	
-	1/2"	12,5 mm		0,0		0,0
3/8"	-	9,5 mm		0,0	0,0	
-	1/4"	6,3 mm		0,0		0,0
N.º 4	-	4,75 mm		0,0	0,0	
N.º 8	-	2,36 mm	17,7	1,7	1,7	
N.º 16	-	1,18 mm	207,1	20,1	21,8	
N.º 30	-	600 µm	305,8	29,7	51,5	
N.º 50	-	300 µm	308,5	29,9	81,4	
N.º 100	-	150 µm	129,5	12,6	93,9	
fundo	-	75 µm	62,6	6,1		100,0
Total			1031,2	100,0	250,3	

Peneiras	% Retida Acumulada											
(mm) →	0,075	0,150	0,300	0,600	1,18	2,36	4,75	6,3	9,5	12,5	19	25
Areia	100,0	93,9	81,4	51,5	21,8	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



φ máx. (mm)	módulo de finura	massa específica			massa unitária		absorção (%)	pulverulento (%)	matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm³)	seca (g/cm³)	aparente (g/cm³)	solta (g/cm³)	4% de umidade (g/cm³)			
2,36	2,50	2,611	2,625	2,603	1,481	1,195	0,32	1,42	+ clara

**CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO**

• **Análise química da água do reservatório da UHE Jaguari**

Laboratório CESP de Engenharia Civil



Projeto P&D					
UHE Jaguari					
ENSAIOS QUÍMICOS EM ÁGUA PARA AMASSAMENTO					
Nº da Amostra			001	Especificações	
Data da Coleta			30.07.2008		
Carta N.º			---		
Local da Coleta			Rio	NM 137:97	
Nº de Referência			3512	Unidades (10 <sup>-6</sup> g/cm <sup>3</sup> )	
				Mín.	Máx.
Resíduos Sólidos			24,60	---	5.000,00
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )			1,85	---	2.000,00
Cloretos (Cl <sup>-</sup> )			4,33	---	*
Ferro (Fe)			0,16	---	1,00
pH à 25°C			6,96	5,50	9,00
Tempo de Pega (mín)	Controle	Inicial	173	Diferença máxima 30	
		Final	333		
	Ensaio	Inicial	217		
		Final	352		
Resistência à Compressão Axial - Tensão (MPa)	Controle	07 dias	26,0	Diferença máxima ( 7d e 28d ) 10%	
		28 dias	32,8		
	Ensaio	07 dias	22,6		
		28 dias	28,5		

\* Concreto simples: 2.000,00; concreto armado: 700,00 e concreto protendido: 500,00

A análise química da água do reservatório da UHE Jaguari que provavelmente foi utilizada na fabricação do concreto na época da construção da barragem apresentou pequenas quantidades de impurezas. Nesta análise, observa-se também que o nível de sulfatos é insignificante.