



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

JULIO CESAR FILLA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE PÓ ULTRAFINO DE  
BASALTO COMO ADIÇÃO NA PREPARAÇÃO DE UM  
CIMENTO MITIGADOR DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA**

---

LONDRINA  
2011

JULIO CESAR FILLA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE PÓ ULTRAFINO DE  
BASALTO COMO ADIÇÃO NA PREPARAÇÃO DE UM  
CIMENTO MITIGADOR DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:

Engenharia de Edificações e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Gilson Morales

LONDRINA  
2011

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da Universidade Estadual de Londrina.**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**

F484e Filla, Julio Cesar.  
Estudo da utilização de pó ultrafino de basalto como adição na preparação de um cimento mitigador da reação álcali-sílica / Julio Cesar Filla. – Londrina, 2011.  
xxi, 167 f. : il.

Orientador: Gilson Morales.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2011.  
Inclui bibliografia.

1. Basalto – Pó ultrafino – Teses. 2. Cimento mitigador – Reação álcali-sílica – Teses. 3. Reação álcali-agregado – Fundações de estruturas – Teses. I. Morales, Gilson. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

CDU 691.214.2

JULIO CESAR FILLA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE PÓ ULTRAFINO DE BASALTO COMO  
ADIÇÃO NA PREPARAÇÃO DE UM CIMENTO MITIGADOR DA  
REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, para obtenção do título de Mestre.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Gilson Morales  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Valdecir Angelo Quarcioni  
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de  
São Paulo - IPT-SP

---

Prof. Dr. José Paulo Peccinini Pinese  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 18 de fevereiro de 2011.

*Aos meus dois filhos: Nicolás e Tomáz. Que além da minha fé possa lhes deixar como legado o apressado pelos estudos e pelo trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Quando chega a este ponto da dissertação, o autor terá vivenciado um grande número de experiências que, se entendidas como inerentes ao processo de desenvolvimento da sua habilidade como pesquisador, serão todas positivas. Neste sentido, só lhe resta agradecer às pessoas que o ajudaram a tornar possível este projeto.

Não seria justo iniciar por outra pessoa que não a minha esposa, Sônia, pois ninguém se sacrificou mais, doou mais tempo, resolveu tantas coisas sozinha, assumiu tantas cargas (emocionais, financeiras, espirituais, familiares, etc.) quanto ela. Obrigado, querida! Seu esforço e dedicação não foram em vão.

Em seguida, quero agradecer ao meu orientador, por tanta liberdade e confiança em meu trabalho. Tudo começou com o convite para a redação de um artigo sobre uma monografia de minha autoria, num curso de especialização, da qual ele também foi meu orientador. Obrigado Gilson, meu orientador de longa data!

Conheci pessoas muito especiais, entre elas estão vários pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). O primeiro que conheci foi o Dr. Sérgio Cirelli Angulo, que muito orgulha o curso de engenharia da UEL, sua escola de origem. Muito obrigado pelas muitas portas que você abriu. Em seguida, agradeço ao Dr. Valdecir Angelo Quarcione, que está à frente do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), responsável pela minha estadia no IPT como estagiário. Obrigado pela sua receptividade e pelo espaço que abria em sua agenda, demonstrando interesse pelo meu trabalho e discutindo algumas questões muito importantes. Obrigado ao Eng<sup>o</sup> Rafael F. C. dos Santos, que me acompanhou na preparação dos ensaios e concentrava todos os resultados. Obrigado pelo seu tempo! Agradeço também ao Geólogo Eduardo B. Quitete, pela troca de informações e literatura e à Dr<sup>a</sup> Maria Heloísa B. O. Frascá, que conduziu a análise petrográfica das amostras de basalto. Obrigado pelo seu interesse e comentários do capítulo de análise dos resultados. Estes profissionais me fizeram confirmar a máxima de que "aquele que mais sabe é o que mais reparte!".

Agradeço também ao Químico Daniel M. Aleixo, que coordenou as análises químicas no laboratório de Química do IPT, por ter encontrado “espaço”, entre tantas análises, para processar as minhas amostras. Obrigado a todos os técnicos de laboratório que me deram suporte ao longo as minhas idas e vindas e me auxiliaram na manipulação de diversos equipamentos. Obrigado. Vocês são parte do meu trabalho.

Ao IPT, que no ano de minha passagem por ele, tornou-se uma instituição centenária. Agradeço pelo acesso que tive aos equipamentos, às instalações e pelas horas de trabalho dos funcionários investidas em meu projeto.

Agradeço à CAPES pela bolsa de estudos concedida em meu primeiro ano de mestrado. Foi fundamental para viabilizar as viagens e as estadias durante a realização dos ensaios no IPT.

Agradeço também à Dr<sup>a</sup> Carina Ulsen, do Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da USP pelas análises granulométricas a laser.

Não posso deixar de agradecer à ULTRAFINE TECHNOLOGIES, de Indaiatuba, através da sua diretora Larissa Altmann, pela gentileza em micronizar as amostras de basalto. Sinceramente, obrigado!

Obrigado à MAKENI CHEMICALS, de Diadema, pelas amostras de dietileno glicol (DEG).

Agradeço ainda aos Profs. Drs. Pedro Maiza e Silvina Marfil, da Universidade Nacional Del Sul, Bahía Blanca, Argentina. Obrigado pelo envio dos artigos de sua autoria, pela leitura e comentários quanto aos resultados e conclusões extraídas de minhas análises e também por compartilharem a sua experiência na análise da reatividade de basaltos.

Obrigado à Prof. Dr<sup>a</sup> Vanderli Marino Melem pelo tratamento estatístico aplicado aos meus resultados experimentais.

Ao Prof. Dr. Carlos José Marques da Costa Branco pelos comentários e observações resultantes de sua participação no exame de qualificação.

Com certeza me esqueci de alguém, mas não se ofenda com isso. Saiba que a sua ajuda foi muito importante para mim.

E por fim, depois de me lembrar de tantos caminhos percorridos, tantas pessoas, tantas coisas que poderiam ter dado errado e não deram, tantas portas que se abriram, tanta força e paciência que minha família teve, é impossível não reconhecer o quanto Deus fez por mim! Agradeço por ter me dado graça diante de tantas pessoas e situações, por ter me dado forças e inteligência. Ofereço a Ele, como um sacrifício de louvor, o resultado deste meu trabalho. A Deus toda a Glória!

**A**prender, ganhar, devolver - estas são as três fases da vida. O primeiro terço deve ser devotado para a educação, o aprendizado; o segundo, para construir uma carreira e um estilo de vida; e o último, mas não menos importante, para retornar alguma coisa para os outros, como forma de gratidão pelo alcançado. Cada estágio parece ser uma preparação para o próximo.

(Jack Balousek)

"... Hum, acho que estou um pouco atrasado... mas,"

(Eu mesmo)

Tudo neste mundo tem o seu tempo; cada coisa tem a sua ocasião.

(Salomão, O Rei)

FILLA, Julio Cesar. **Estudo da utilização de pó ultrafino de basalto como adição na preparação de um cimento mitigador da reação álcali-sílica.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

## RESUMO

A identificação da reação álcali-agregado em fundações de estruturas convencionais, no início do séc. 21, induziu a uma retomada significativa no estudo de formas para mitigá-la. Até então, a reação álcali-agregado era tida como uma patologia restrita a estruturas hidráulicas, como pontes e barragens. Em decorrência desta situação estabeleceu-se uma normalização específica sobre o assunto, a ABNT NBR 15.577, que prove um roteiro para diminuir os riscos da ocorrência desta patologia. As primeiras medidas foram sugeridas ainda nos anos de 1940 por Stanton, o primeiro a relatar a sua ocorrência, que propôs a utilização somente de cimentos com baixo teor de álcalis (<0,60%) e a adição de pozolanas ao concreto. Atualmente, a adição de cinzas volantes, escória de alto forno, cinzas de casca de arroz, microssílica e metacaulin é um procedimento reconhecido no meio técnico e científico. Estes materiais são conhecidos como adições ativas ou adições cimentícias suplementares (SCM). Por outro lado, uma nova linha de pesquisa estuda a utilização de pós de agregados reativos (RAP). Esta vertente parte do princípio que, quanto mais reativo for o agregado gráudo, mais eficiente em combater a reação álcali-agregado é o pó dele derivado. Este presente trabalho transcorre dentro deste contexto de pesquisa e avalia o potencial de utilização do pó ultrafino de basalto para o desenvolvimento de um cimento mitigador da reação álcali-sílica. Foram estudadas duas amostras de basalto provenientes de jazidas do Norte do Paraná. O material pulverulento obtido de ambas as amostras foi micronizado e utilizado em substituição parcial ao cimento do tipo CPV ARI, em três teores distintos (30%, 45% e 60%), gerando três cimentos experimentais. A eficiência destes cimentos foi avaliada através do teste acelerado de barras de argamassa. O resultado indicou que, embora o pó ultrafino de basalto apresentasse baixa atividade pozolânica, foi eficiente em reduzir a expansão das barras, o que leva a se considerar outros mecanismos para sua atuação como agente mitigador da reação álcali-sílica.

**Palavras-chave:** Basalto. Reação álcali-sílica. Mitigação da reação álcali-sílica. Pó ultrafino. RAP.

FILLA, Julio Cesar. **Study of the use of fineness powder as additive in the preparation of a cement mitigating alkali-silica reaction.** 2011. Dissertation (Master's Degree in Construction and Sanitation Engineering) - State University of Londrina, Londrina.

### **ABSTRACT**

The reaction identification alkali-aggregate in conventional structure foundations, in the beginning of the twentieth first century led significance retake in the shape studies to mitigate it, so far, the alkali-aggregated was a restrictive pathology to hydraulic structures, as bridges and retaining wall. Due to this situation a specific normalization had been established about the subject, an ABNT NBR 15.577, that proves a way to reduce the risks of this pathology. The firsts suggested measures against it on the years 1940 was made by Stanton, the first to relate his occurrences, he suggested to use only low amounts of alkali-aggregated cement (<0,60%) and the addition of pozzolans cement. Actually, the addition of fly ashes, blast furnace slag, rice shells ashes, microsilica and metakaolin it's a recognized procedure by scientific and technical environment. This materials are known as active additions or supplementary cement materials (SCM), whoever, a new research line studies the utilization of reactive aggregated powders (RAP). This line start with the principle that the more reactive is the aggregate course, more efficient to combat the reaction alkali-aggregate is the powder derivate. This work flows through a research context and evaluates the potential using of the fineness basalt powder to develop a mitigate cement from alkali-silica reaction. Two samples of basalt from the rocks in northeast Parana were studied. The powder particles material got from both samples was micronized and used as partial substitute of the CPV ARI in three different volumes (30%, 45%, and 60%) creating three experimental cements. The efficiency of these cements was evaluated through an accelerate mortars testing bars. The result had indicated that even the fineness basalt powder showed a pozolannic low activity, it was enough to reduce the bars expansion, what makes it to consider other mechanisms to his acting as an mitigation agent of the alkali-silica reaction.

**Key words:** Basalt. Alkali-silica reaction. Reaction alkali-silica. Mitigation reacting. Alkali-silica. Fineness powder, RAP.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 4.1** – Bacia do Paraná – Subdivisão do Basalto em 4 regiões geoquimicamente diferentes. Região I: Centro-leste riograndense; Região II: Centro-oeste paranaense; Região III: Centro-leste paulista; Região IV: Litoral Norte do Estado de São Paulo (Rüegg; Amaral, 1976) ..... 40
- Figura 4.2** – Geologia do Norte e Noroeste do Paraná. Fonte: Bartorelli A. (1983). Legenda: Kb (Grupo Bauru), JKsg (Formação Serra Geral), Pen (Formação Estrada Nova), Pi (Formação Irati), PCia (Formação Itararé-Aquidauna), Df (Formação Furnas), PC (Pré-Cambriano), Qa (Aluviões em geral) ..... 32
- Figura 4.3** – Unidades estruturais dos argilominerais. Adaptação de (SOUZA, S. P.; 1975 apud PERGUER, S. B. C. et al, 1999) ..... 49
- Figura 4.4** – Representação morfológica de uma esmectita (montmorilonita) evidenciando a distribuição das cargas sobre a sua superfície. Figura adaptada de Chagas, 2005 apud Vidal, 2009 ..... 51
- Figura 4.5** – Estrutura idealizada de uma esmectita 2:1 (montmorilonita), adaptada de Perguer, S. B. C. et al (1999) ..... 52
- Figura 4.6** – Representação esquemática do modo como ocorre a redução da porosidade e da permeabilidade em função do inchamento das esmectitas. Civan (2000) apud Cardoso, J. J. B. (2005) ..... 53
- Figura 4.7** – Ilustração do modelo proposto do Plun; Pousen; Idorn desenhada a partir de Paulon (1981). a) Partícula reativa b) fase inofensiva ..... 61
- Figura 4.8** – Ilustração do modelo proposto do Plun; Pousen; Idorn desenhada a partir de Paulon (1981): c) Fase deletéria d) Exsudação de gel ..... 61
- Figura 4.9** – Formas de adsorção de íons, segundo Prezzi (1997) ..... 68
- Figura 4.10** – Agregado reativo em contato com a solução alcalina dos poros de concreto. (Collins, C. L. et al, 2002) ..... 69

<b>Figura 4.11</b> – A superfície do agregado reativo sendo atacado pelos íons $\text{OH}^-$ formando grupos silanóis. (Collins, C. L. et al, 2002).....	70
<b>Figura 4.12</b> – Os grupos silanóis são rompidos pelas hidroxilas formando íons $\text{SiO}^-$ na superfície do agregado. (Collins, C. L. et al, 2002).....	70
<b>Figura 4.13</b> – Formação de gel alcalino na superfície do agregado (Collins, C. L. et al, 2002).....	71
<b>Figura 4.14</b> – Expansão do gel alcalino formado na superfície do agregado. (Collins, C. L. et al, 2002) .....	71
<b>Figura 4.15</b> – Fissuramento do concreto após ser atingida a sua tensão máxima de tração (Collins, C. L. et al, 2002) .....	72
<b>Figura 4.16</b> – Detalhes dos esforços entre dois planos utilizados nos equipamentos de moagem: a) pressão, b) impacto, c) arraste e d) choque Adaptado de Wellenkamp (1999).....	85
<b>Figura 5.1</b> – Teores de adição utilizados na composição dos cimentos experimentais.....	91
<b>Figura 5.2</b> – Moinho de jatos opostos para uso em laboratório. Modelo Multino <sup>®</sup> 1270 M/S/M. (Fonte: <a href="http://www.ultrafine.com.br">http://www.ultrafine.com.br</a> ) .....	94
<b>Figura 5.3</b> – Esquema genérico do moinho de jatos opostos ilustrando em “a” o princípio de funcionamento da moagem e em “b” o princípio de classificação de partículas. (Fonte: <a href="http://www.ultrafine.com.br">http://www.ultrafine.com.br</a> ) .....	94
<b>Figura 5.4</b> – Misturador tipo “Y” utilizado para a mistura das amostras micronizadas de basalto BL e BA a fim de aumentar o volume de material disponível para realização dos ensaios.....	97
<b>Figura 5.5</b> – a) Processo de lavagem dos agregados sob água corrente b) Frações granulométricas já lavadas e secas em estufa aguardando o resfriamento para acondicionamento em recipiente limpo e fechado.....	98
<b>Figura 5.6</b> – a) Preparação das formas (calibração); b) Iniciando a moldagem das barras pelas extremidades; c) Preenchimento e compactação cuidadosa da argamassa; d) Finalização da moldagem das barras.....	98

<b>Figura 5.7</b> – De A) a C) Barras de argamassa após a desmoldagem; D) Barras de argamassa descansando em banho termo regulador a 80°C.....	100
<b>Figura 5.8</b> – a) Banho termorregulador ajustado para 80°C; b) Registro da tomada do comprimento inicial das barras de argamassa. A mesma operação se repetiu ao longo do ensaio.....	101
<b>Figura 6.1</b> – Fotomicrografia revelando aspecto da textura intergranular do basalto BL, sendo que ao centro apresenta-se glomeroporfirítica ....	109
<b>Figura 6.2</b> – Fotomicrografia revelando a textura intergranular microporfirítica do basalto BA.....	110
<b>Figura 7.1</b> – a) Visão geral do mecanismo de fixação das placas do de um moinho pulverizador vibratório; b) Conjunto de placas. (Fonte: <a href="http://www.dairix.com.br/equipaments/55">http:// www.dairix.com.br/equipaments/55</a> ).....	117

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 4.1</b>	– Produção anual de brita de 2004 a 2008 (BRASIL, 2009) .....	29
<b>Gráfico 4.2</b>	– Produção anual de brita a partir de basalto ou diabásio de 2004 a 2007 (BRASIL, 2008).....	29
<b>Gráfico 4.3</b>	– Composição média dos cimentos brasileiros no ano de 2003 (MUNHOZ, 2004 apud MUNHOZ, 2007) .....	35
<b>Gráfico 4.4</b>	– Indicação da variação dimensional das barras de argamassa confeccionadas com amostras de agregado basáltico ensaiadas segundo a metodologia ASTM C-1260. Amostras: 65129: Londrina; 65130: Maringá; 65131: Arapongas; 65132: Apucarana....	44
<b>Gráfico 4.5</b>	– Distribuição das amostras de basalto estudadas no plano das variáveis principais C1 e C2. Adaptado de Marfil et al, 2005 .....	47
<b>Gráfico 4.6</b>	– Variação da solubilidade da sílica em função do pH da solução (Fonte: VOGELSBERGER et al apud PREZZI, 1997).....	67
<b>Gráfico 6.1</b>	– Distribuição granulométrica do material pulverulento de basalto – Basalto BL.....	111
<b>Gráfico 6.2</b>	– Distribuição granulométrica do Basalto BL – micronizado .....	112
<b>Gráfico 6.3</b>	– Distribuição granulométrica do Basalto BA–micronizado.....	112
<b>Gráfico 6.4</b>	– Distribuição granulométrica do Basalto BA + BL – micronizado.....	112
<b>Gráfico 6.5</b>	– Redução da expansão linear de barras de argamassa moldadas com cimentos contendo diferentes teores de adição de pó micronizado de basalto.....	115
<b>Gráfico 7.1</b>	– Evolução da superfície específica (Blaine) em função do tempo de moagem e após o peneiramento na peneira nº 270.....	117
<b>Gráfico 7.2</b>	– Evolução da superfície específica do material pulverulento de basalto sem a aplicação da peneira nº 270 após a moagem.....	118
<b>Gráfico 7.3</b>	– Evolução do Índice de atividade pozolânica (IAP) em função do aumento da superfície específica (Blaine) .....	119
<b>Gráfico 7.4</b>	– Variação da superfície específica com 60 min de processamento em 3 condições distintas .....	120
<b>Gráfico 7.5</b>	– Comparação da eficiência de moagem do material pulverulento de basalto com e sem utilização de dietileno glicol .....	121

<b>Gráfico 7.6</b>	– Curva de distribuição granulométrica do material pulverulento de basalto submetido a moagem por 2 minutos no moinho vibratório de anéis disponível no LCT .....	121
<b>Gráfico 7.7</b>	– Curva de distribuição granulométrica do material pulverulento de basalto submetido a moagem por 35 minutos no moinho vibratório de anéis disponível no IPT .....	122
<b>Gráfico 7.8</b>	– Análise de regressão para determinação do teor mínimo de adição de pó ultrafino afim de atender o limite de 0,10% de expansão .....	125
<b>Gráfico 7.9</b>	– Evolução da variação dimensional das barras de argamassa com o incremento do teor de pó ultrafino de basalto .....	125
<b>Gráfico 7.10</b>	– Verificação da eficiência da adição de pó de basalto em diversos teores na redução da expansão em barras de argamassa .....	127
<b>Gráfico 7.11</b>	– Associação da minimização da relação (CaO/SiO <sub>2</sub> ) à redução da expansão devido à reação álcali-sílica em barras de argamassa.....	130
<b>Gráfico 7.12</b>	– Associação da redução das expansões lineares com a minimização da relação (CaO/SiO <sub>2</sub> ) .....	131
<b>Gráfico 7.13</b>	– Associação da redução do teor de Ca(OH) <sub>2</sub> com a redução da expansão linear em barras de argamassa em função do teor de adição de pó ultrafino de basalto .....	132
<b>Gráfico 7.14</b>	– Relação inversa entre teor de esmectitas presentes na adição e expansão linear em barras de argamassa .....	133
<b>Gráfico 7.15</b>	– Comparação dos tempos de início e fim de pega entre o CPV ARI e o cimento experimental com 49 % de adição de pó ultrafino de basalto.....	136
<b>Gráfico 7.16</b>	– Comparativo da evolução das resistências entre o cimento CP V ARI e o cimento experimental com 49 % de adição de pó ultrafino de basalto .....	137
<b>Gráfico 7.17</b>	– Comparação entre o teor de álcalis e equivalente alcalino presentes no CP V ARI e no cimento experimental. ....	138
<b>Gráfico 7.18</b>	– Relação entre o percentual de adição de pó ultrafino de basalto e a evolução das expansões lineares com o tempo de ensaio.....	139

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 4.1</b> – Composição dos diferentes tipos de Cimentos Portland fabricados no Brasil .....	34
<b>Quadro 4.2</b> – Relação de estudos com pó de agregados reativos descritos em literatura .....	77

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4.1</b> – Composição geoquímica das rochas basálticas de quatro regiões, anomalias, identificadas na Bacia do Rio Paraná. (Rüegg; Amaral, 1976) .....	38
<b>Tabela 4.2</b> – Expansão, teor de sílica dissolvida e porcentagem de montmorilonita nos basaltos estudados provenientes das províncias argentinas de Rio negro (RN), Neuquen(N) e Misiones (M) . MARFIL et al (2005). .....	47
<b>Tabela 4.3</b> – Capacidade de troca catiônica de alguns argilominerais (PIMENTA, 1995 apud CARDOSO, J. J. B., 2005).....	55
<b>Tabela 4.4</b> – Teores mínimos de SCM necessários para a mitigação da reação álcali-sílica gerada da combinação de agregados basálticos e cimento de alta resistência inicial (MUNHOZ, 2007) .....	74
<b>Tabela 4.5</b> - Resumo dos resultados da difração de Raios -X para o agregado basáltico (TASONG et al, 1998) .....	83
<b>Tabela 4.6</b> – Classificação dos moinhos quanto ao tipo de esforço empregado e ao tipo de moagem (WELLWINKAMP, 1999). .....	86
<b>Tabela 4.7</b> – Composição química dos agregados antes e após a cominuição (CARLES-GIBERGES, A. et al, 2008).....	87
<b>Tabela 5.1</b> – Resumo dos ensaios de caracterização dos materiais.....	92
<b>Tabela 5.2</b> – Faixas granulométricas e quantitativos para produção da argamassa no teste acelerado de barras .....	97
<b>Tabela 5.3</b> – Traço das argamassas utilizadas na moldagem das barras no teste acelerado.....	99
<b>Tabela 6.1.1</b> – Resultado dos ensaios químicos para caracterização dos ligantes.....	106
<b>Tabela 6.1.2</b> – Resultados dos ensaios físicos e mecânicos para caracterização dos aglomerantes .....	104
<b>Tabela 6.1.3</b> – Características químicas das amostras de basalto e do pó micronizado utilizados no estudo.....	105

<b>Tabela 6.1.4</b>	– Massa específica relativa, dureza e composição química de alguns dos minerais constituintes do basalto BA e basalto B.....	106
<b>Tabela 6.1.5</b>	– Resumo dos resultados dos ensaios químicos do pó ultrafino de basalto (BA + BL) comparados às exigências químicas da Norma NBR 12653:1992 para materiais pozzolânicos .....	107
<b>Tabela 6.1.6</b>	– Síntese das principais características petrográficas da amostra de basalto BL .....	108
<b>Tabela 6.1.7</b>	– Síntese das principais características petrográficas da amostra de basalto BA.....	109
<b>Tabela 6.1.8</b>	– Análise mineralógica do pó de basalto micronizado.....	111
<b>Tabela 6.1.9</b>	– Resultado da análise granulométrica em relação aos diâmetros obtidos .....	113
<b>Tabela 6.2.1</b>	– Índice de atividade pozzolânica (IAP) com a cal, aos 7 dias, do material pulverulento de basalto (BASALTO BL) moído em moinho pulverizador vibratório de anéis.....	114
<b>Tabela 6.2.2</b>	– Resultado do ensaio de Chapelle modificado demonstrando o consumo de CaO das amostras de material pulverulento de basalto micronizadas.....	115
<b>Tabela 7.1</b>	– Variações dos ciclos de 60 min utilizadas para avaliar a possibilidade de redução da formação de aglomerações.....	119
<b>Tabela 7.2</b>	– Comparação da distribuição granulométrica resultante do processamento do material pulverulento de basalto em moinhos vibratórios de anéis em tempos distintos .....	122
<b>Tabela 7.3</b>	– Associação da relação entre o teor de óxido de cálcio e sílica e a redução da expansão devida à reação álcali-sílica.....	129
<b>Tabela 7.4</b>	– Estimativa do teor de esmectitas presentes nos cimentos experimentais em função do teor de adição .....	133

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>28</b>
4.1	GENERALIDADES.....	28
4.2	A UTILIZAÇÃO DE ADIÇÕES MINERAIS NA PRODUÇÃO DE CIMENTO.....	32
4.3	O BASALTO.....	36
4.4	OS BASALTOS DO NORTE DO PARANÁ .....	39
4.5	COMPORTAMENTO REATIVO DO BASALTO.....	41
4.6	ARGILOMINERAIS: ESMECTITAS E MONTMORILONITAS .....	48
4.7	A REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA .....	55
4.7.1	HISTÓRICO .....	55
4.7.2	A Reação Álcali-Sílica: Modelos e Entendimento Atual .....	58
4.8	A MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA .....	72
4.9	USO DO PÓ DE AGREGADOS REATIVOS NA MITIGAÇÃO DA RAS .....	76
4.10	O USO DE FINOS DE BRITAGEM DE BASALTO E A MITIGAÇÃO DA RAS.....	79
4.11	MOAGEM FINA E ULTRAFINA .....	84
<b>5</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>88</b>
5.1	MATERIAIS .....	88
5.1.1	Basalto .....	88
5.1.2	Cimento Portland .....	90
5.1.3	Cimentos Experimentais Preparados em Laboratório .....	90
5.2	MÉTODO .....	91
5.2.1	Hipótese de Trabalho .....	91
5.2.2	Delineamento Experimental .....	91
5.2.2.1	Caracterização dos materiais.....	92

5.2.2.2	Preparação da amostra de pó ultrafino de basalto .....	93
5.2.2.3	Verificação da atividade pozolânica.....	95
5.2.2.4	Verificação da mitigação da reação álcali-sílica .....	96
5.2.3	Unidades de Análise e Variáveis Observadas .....	101
<b>6</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>103</b>
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	103
6.1.1	Caracterização Física, Química e Mecânica dos Aglomerantes .....	103
6.1.2	Caracterização Química dos Agregados e Adições .....	105
6.1.3	Análise Petrográfica e Mineralógica do Basalto .....	107
6.1.3.1	Análise petrográfica e mineralógica .....	107
6.1.4	Análise Granulométrica.....	111
6.2	AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO MATERIAL PULVERULENTO DE BASALTO.....	113
6.2.1	Reatividade com a Cal (IAP) .....	114
6.2.2	Método de Chapelle Modificado .....	114
6.3	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL MITIGADOR DOS CIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	115
<b>7</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>116</b>
7.1	ENSAIOS EXPLORATÓRIOS .....	116
7.2	ATIVIDADE POZOLÂNICA DO MATERIAL PULVERULENTO DE BASALTO ATIVADO MECANICAMENTE.....	123
7.3	MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA PELO USO DE PÓ ULTRAFINO DE BASALTO.....	125
7.4	PROPOSIÇÃO DE MECANISMOS ENVOLVIDOS NA AÇÃO MITIGADORA DO PÓ ULTRAFINO DE BASALTO SOBRE A REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA .....	127
7.4.1	Diluição do Teor de Álcalis.....	128
7.4.2	Redução da permeabilidade .....	128
7.4.3	Aumento na Fixação de Álcalis Pelo C-S-H.....	129
7.4.4	Redução do pH.....	131
7.4.5	Redução do Teor de Álcalis Disponíveis Pela Ação Fixadora das Esmectitas.....	132

7.4.6	Redução da Relação CaO/SiO <sub>2</sub> Pela Ação Sinérgica Entre a Remoção de Ca <sup>2+</sup> e Liberação de Sílica Pelas Esmectitas.....	134
7.5	QUANTO À UTILIZAÇÃO DO PÓ ULTRAFINO DE BASALTO NA PRODUÇÃO DE CIMENTO MITIGADOR DA RAS .....	135
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>141</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>144</b>
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....</b>	<b>151</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>154</b>
	<b>ANEXO A - Resultados da análise petrográfica das amostras de basalto BA e BL .....</b>	<b>155</b>
	<b>ANEXO B - Resultados da análise da reatividade álcali-agregado .....</b>	<b>162</b>
	<b>ANEXO C - Resultados da análise granulométrica .....</b>	<b>166</b>

---

# 1 INTRODUÇÃO

**O**s problemas decorrentes da reação álcali-agregado (RAA) deixaram de ser preocupação apenas em obras de arte, como barragens e pontes, e passaram a ser objeto de análise em estruturas civis correntes, como é o caso de superestruturas de edifícios comerciais, residenciais e industriais, blocos de fundações, bases de concreto para equipamentos e elementos pré-moldados como pilares, postes e cruzetas de concreto.

Um texto que relata estes problemas é o trabalho de Villaça (apud TIECHER, 2006) que descreve ocorrências da reação álcali-agregado nas fundações do edifício Areia Branca, em 2004 e em outros dois edifícios na região metropolitana do Recife.

Ventura (2004 apud TIECHER, 2006) registra que no meio técnico se considera que a reação álcali-agregado, uma vez desencadeada, é praticamente impossível de ser contida e, atuar de forma preventiva, é o melhor caminho.

Para que a reação ocorra, segundo Prezzi (1997), é necessário que se configurem a presença de três elementos: disponibilidade de álcalis, presença de sílica reativa e água para possibilitar a expansão do gel. Se um destes elementos não estiver presente, a reação não ocorrerá.

Recentemente, foi publicada a NBR 15.577:2008, compostas de 6 partes, que visa prover o meio técnico de um roteiro para abordar adequadamente o problema da reatividade álcali-agregado. Segundo esta norma, a reação álcali-agregado é assim definida: "Reação química entre alguns constituintes presentes em certos tipos de agregados e componentes alcalinos que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto".

A parte 1 da NBR 15.577 foi elaborada para possibilitar uma análise de risco quanto à ocorrência da reação álcali-agregado em uma determinada estrutura. A partir da determinação do risco, a norma sugere ações preventivas. Segundo Battagin (2008), a elaboração desta parte da norma levou em conta que a eliminação de apenas um dos fatores condicionantes da RAA é suficiente para inibir o seu desencadeamento.

A melhor opção, para a prevenção, é utilizar agregados que não apresentem fase reativa, porém, nem sempre isso é viável economicamente em função de algumas condicionantes, como por exemplo, o custo do transporte da jazida até o local da obra.

Em relação à exposição de elementos ou estruturas correntes à água, constata-se que há uma multiplicidade de situações possíveis. Numa mesma edificação há elementos que estão permanentemente sujeitos à umidade, como é o caso de vigas baldrame e fundações, as quais necessitam de uma maior proteção. Outras, por sua vez, como bases internas para equipamentos pesados ou estruturas de concreto revestidas, demandam proteção moderada. Dessa forma, não é funcional a adoção de medidas preventivas relacionadas à eliminação do contato com a água.

Outra alternativa sugerida é a redução do teor de álcalis presentes no concreto, que pode ser obtida ajustando-se o traço, com a utilização de adições pozolânicas tradicionais, como cinzas volantes, escória, sílica ativa ou metacaulim, em substituição parcial do cimento, ou pela troca do tipo de cimento.

Efetuar ajustes no traço nem sempre é viável tecnicamente, uma vez que o concreto deve atender a outras exigências, além da prevenir a ocorrência da reação álcali-agregado.

Por outro lado, reconhecidamente, a maior fonte dos álcalis presentes no concreto é o cimento. Adotar um cimento que seja mais adequado parece ser uma forma prática e eficiente de evitar o desencadeamento da reação álcali-agregado (TIECHER, 2006).

O mercado brasileiro de cimento disponibiliza cinco tipos básicos, dos quais dois deles apresentam potencialmente a capacidade de inibir a reação álcali-agregado, sendo os cimentos do tipo III (alto forno) e do tipo IV (pozolânico). A questão é que nem sempre tais cimentos estão disponíveis onde é necessário. Uma preocupação apontada por Munhoz (2007) é saber se, em função do teor de material reativo presente no agregado, o teor de adição utilizada nestes cimentos é suficiente para conter a reação álcali-agregado. Esta observação está de acordo com Tiecher (2006) que, mesmo reconhecendo esta diversidade de cimentos, afirma que ainda há necessidade de estudos mais aprofundados quanto a sua eficiência em prevenir as reações expansivas.

A incorporação ao cimento de materiais com propriedades pozolânicas, sejam naturais ou não, tem sido uma alternativa para resolver de modo sustentável, não somente a questão da reação álcali-agregado, mas diversas outras patologias que podem comprometer a durabilidade do concreto, possibilitando a melhoria de algumas de suas propriedades.

Neste campo, há duas linhas básicas de pesquisa que podem ser identificadas na literatura (CARLES-GIBERGUES et al, 2008). Uma das linhas trabalha com materiais pozolânicos tradicionais (cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto forno e metacaulim), que também são chamados de materiais cimentícios suplementares ou SCM (PAPADAKIS, V.G., et al, 2002). A segunda linha, mais recente, utiliza pó de agregados reativos, chamados RAP, obtidos a partir da moagem do próprio agregado utilizado na confecção do concreto. (CARLES-GIBERGUES et al, 2008).

Este estudo se desenvolverá nesta segunda linha de pesquisa, avaliando a utilização de pó ultrafino de basalto com vistas ao desenvolvimento de um cimento mitigador da reação álcali-agregado e, mais especificamente, da reação álcali-sílica (RAS).

---

## 2 JUSTIFICATIVA

**A** crescente conscientização do meio técnico quanto ao problema da reação álcali-agregado tem levado ao estudo aprofundado de materiais que possam ser utilizados na sua mitigação.

A observação de que o pó de certos agregados reativos, como a perlita e a pumicita (CARLES-GIBERGUES, 2008), foi utilizado com sucesso na redução da expansão gerada pela reação álcali-sílica é estimulante no sentido de avaliar se o mesmo fenômeno ocorre de, forma geral, com agregados de outra origem mineral, como o basalto, que é considerado potencialmente reativo.

O Brasil possui um dos maiores derrames de basalto do mundo, quase todo concentrado na Bacia do Rio Paraná, que se constitui em fonte de matéria prima utilizada na produção de agregados para concreto.

O processo de produção de agregados, variando conforme o tipo de britador utilizado, gera, via-de-regra, grandes quantidades de rejeitos sob a forma de pó (ANDRIOLO, 2005). Uma parte destes se acumula junto às unidades de britagem e outra segue incorporada aos agregados produzidos.

A fim de remover este pó, adequando o agregado às exigências de norma, este deve ser lavado. O processo de lavagem produz uma lama que é estocada em reservatórios a céu aberto e, depois de seca, destinada a aterros.

Caso o resultado deste estudo se mostre positivo, abre-se a possibilidade de implementar uma destinação mais sustentável aos rejeitos de britagem que se acumulam nas pedreiras que beneficiam rochas basálticas e acabam gerando um passivo ambiental significativo.

Como decorrência das informações disponíveis na literatura, sugerem-se as seguintes questões de pesquisa:

- a) O basalto ativado mecanicamente, através de moagem ultrafina, desenvolve atividade pozolânica?
- b) O pó ultrafino de basalto apresenta a propriedade de mitigar a reação álcali-sílica?
- c) Há um teor mínimo de adição deste pó ultrafino de basalto que seja efetivo na mitigação da reação álcali-sílica.
- d) A adição do pó ultrafino de basalto ao cimento do tipo CP V ARI resulta em um tipo de cimento similar a algum dos cimentos Portland já definidos na normalização brasileira?

Em adição a estas questões, do ponto de vista da implementação do desenvolvimento sustentável na indústria da construção civil, novos mecanismos que possam prevenir o desencadeamento da reação álcali-sílica adquirem uma grande importância em função dos recursos técnicos, econômicos e naturais consumidos para tratar as patologias dela decorrentes.

Assim, a depender do estado de comprometimento da estrutura afetada pela reação álcali-sílica, a solução a ser adotada pode envolver desde o simples monitoramento através de instrumentação, à substituição de partes da estrutura ou a sua completa demolição (MUNHOZ, 2007). O monitoramento destas estruturas exige a aquisição de equipamentos de custo elevado e, obviamente, o envolvimento de equipes capacitadas tanto para a implantação da instrumentação, quanto para o acompanhamento e interpretação permanente das leituras efetuadas.

Tanto a substituição de partes da estrutura, quanto a sua demolição completa, geram resíduos que devem ser tratados e destinados adequadamente, além do que, a nova estrutura, recuperada ou reconstruída, irá demandar novos recursos naturais para a sua construção.

Outro fato relevante, que deve ser considerado ao se demonstrar a importância deste tema, são os estudos quanto à possibilidade da incorporação de adição de pó ultrafino de basalto na preparação de cimentos compostos ou pozolânicos. Esta possibilidade, se confirmada, contribuiria diretamente para a preservação das jazidas de calcário e argila utilizados como matéria-prima na produção do clínquer de

cimento Portland. É natural que se espere, desse modo, uma contribuição considerável para a redução da emissão de CO<sub>2</sub> no processo de produção de cimento.

As informações constantes na literatura sobre a utilização de pó de agregados reativos para mitigação da RAS, as questões de pesquisa apontadas e as considerações sobre sustentabilidade, reunidas, demonstram a relevância do estudo do tema e abrem espaço para a delimitação dos objetivos desta pesquisa.

---

### 3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é verificar a potencialidade do uso de pó ultrafino de basalto como adição para o desenvolvimento de cimento mitigador da reação álcali-sílica.

Em decorrência, propõem-se os seguintes objetivos específicos, de cuja resolução depende a consecução deste trabalho:

- a) Avaliar o desenvolvimento da atividade pozolânica do material pulverulento de basalto quando ativado mecanicamente.
- b) Avaliar o desempenho da adição de pó ultrafino de basalto quanto à mitigação da reação álcali-sílica.
- c) Sugerir mecanismos de ação que justifiquem a mitigação da reação álcali-sílica pela adição de pó ultrafino de basalto.

---

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 GENERALIDADES

O conceito de desenvolvimento sustentável freqüentemente inclui aspectos ligados ao aproveitamento de recursos naturais, trazendo como elementos principais a redução do uso de energia e a preservação das fontes de recursos minerais. Uma análise mais detalhada levanta questões ligadas à utilização de recursos minerais locais, bem como o aproveitamento de subprodutos da exploração destes.

A construção civil, de um modo geral, é tida como uma das principais indústrias consumidoras de recursos naturais e geradora de resíduos.

Uma estimativa propõe que a construção civil seja responsável por consumir cerca de 20% a 50% do total de recursos naturais utilizados pela sociedade (SJÖSTRÖM, 1992 (apud JOHN, V. M., 20--?)).

Em termos de relevância econômica, a produção de agregados para a construção civil, tem, possivelmente, uma importância tão grande quanto à do minério de ferro (CHAVES, A. P.; CHIERAGATI, A. C. 2002)

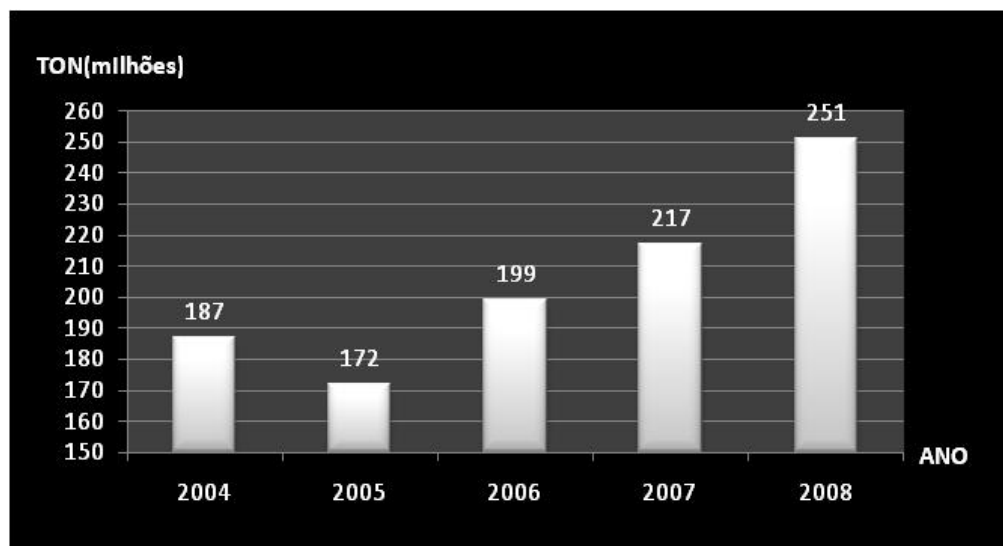
O Sumário Mineral de 2009 informa que a produção de brita no ano de 2008 atingiu a marca de 251 milhões de toneladas. Deste volume, considera-se que 5% seja extraído de rochas basálticas e diabásio. Em termos de aplicação, 70% presta-se à utilização com cimento Portland, dos quais 35% têm como destino concreteiras, 15% indústrias de pré-moldados, 10% são revendidos ao mercado consumidor e o restante (40%) outras aplicações (BRASIL, 2008). Os gráficos 4.1 e 4.2 ilustram as informações.

Como um subproduto do processo para obtenção de agregados, a partir da cominuição de rochas, sejam estes brita ou areia, surgem o filer ou microfino, com dimensão inferior a 150  $\mu\text{m}$  (0,15 mm) e os materiais pulverulentos, que passam na

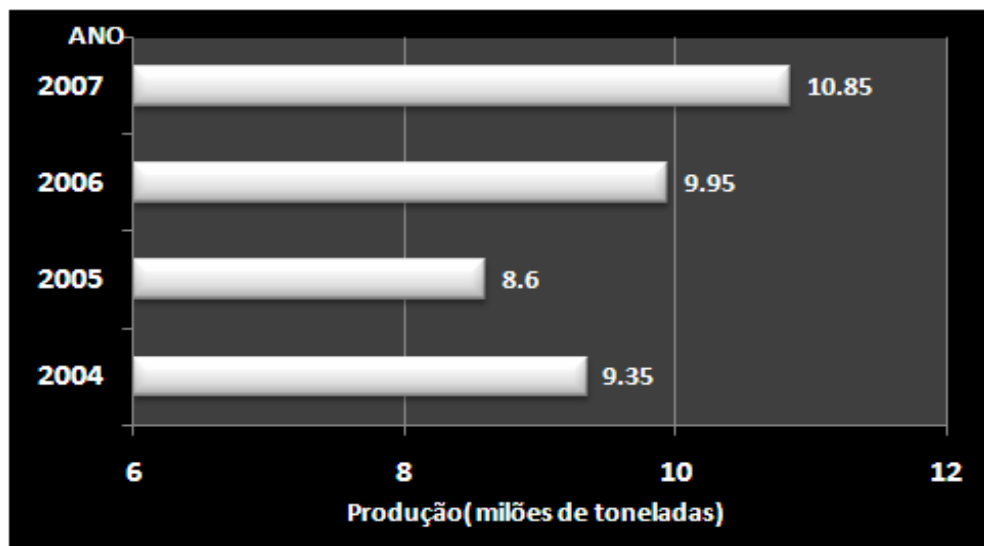
peneira de malha 75  $\mu\text{m}$  (0,075 mm). A utilização da areia de britagem para obtenção de concretos e argamassas a base de cimento Portland, vem se tornando uma alternativa bastante interessante, uma vez que as jazidas de areia natural estão se esgotando e, via-de-regra, situam-se distantes das unidades produtoras de concreto.

A areia de britagem, em função do tipo de unidade britadora utilizada, poderá apresentar elevados teores de materiais pulverulentos.

**Gráfico 4.1** – Produção anual de brita de 2004 a 2008 (BRASIL, 2009).



**Gráfico 4.2** – Produção anual de brita a partir de basalto ou diabásio de 2004 a 2007 (BRASIL, 2008).



A NBR 7211:2009 impõe uma limitação quanto ao teor de material pulverulento presente na areia de britagem utilizada na produção de concreto. Para concretos submetidos ao desgaste superficial o teor máximo é de 10% e para os demais concretos não sujeitos a desgaste superficial, 12%.

Para atender esta especificação, a areia de britagem deve passar por um tratamento que remova o excesso de materiais pulverulentos nas próprias plantas de produção. Algumas pedreiras empregam, nesta operação, equipamentos que utilizam água, que é a responsável pelo carreamento de grande parte do material pulverulento, outras realizam a captação através de filtros de manga.

De modo geral, este resíduo é retirado e depositado a céu aberto, sendo periodicamente descartado em aterros (LANG, L.C., 2006). Como decorrência natural deste processo, surgem conflitos de ordem ambiental, social e imobiliária (CHAVES, A. P.; CHIERAGATI, A. C. 2002).

Os conflitos de ordem ambiental originam-se do processo de exploração, que se dá a céu aberto, por causa da geração de subprodutos em uma escala cujo aproveitamento, atualmente, é incompatível com o volume produzido.

Considerando que 10 a 15% de filer são gerados em média a cada metro cúbico de brita produzido e que destes, 20% são representados por materiais pulverulentos (CAMARINI; ISHIKAWA; 2004 apud LANG 2006), sendo a eficiência do processo de lavagem de 94% (TERRA; 2000 apud LANG; 2006), pode-se ter uma idéia da ordem de grandeza da geração destes resíduos.

Além da limitação do teor de materiais pulverulentos presentes em britas ou areias de britagem utilizados como agregados, estes devem ser avaliados quanto ao seu potencial reativo com os álcalis do cimento. Nesse sentido, a NBR 15577-3: 2008 traz em seu anexo A, de caráter informativo, uma tabela com as rochas consideradas susceptíveis à reação álcali-agregado.

Um dos problemas associados a esta questão, está no fato de que a construção civil deve ser suprida de agregados, prioritariamente, através de lavras situadas próximas às cidades, por causa do seu baixo valor agregado e do impacto do custo de transporte no valor final de venda (BRASIL, 2009).

Quando avaliado em relação à reatividade com os álcalis do cimento, estes podem mostrar-se potencialmente deletérios ou mesmo deletérios. Neste caso a sua utilização fica inviabilizada, sob o risco de provocar danos, prejuízo à utilização da edificação ou mesmo acidentes graves, a partir de estruturas de concreto confeccionadas com tais agregados.

Desde 1940, quando Stanton descreveu as primeiras patologias em concreto decorrentes da reação álcali-agregado, o meio técnico tem estado bastante atento a este problema, especialmente pela dificuldade de reparo e pelo longo tempo de "incubação" até a sua manifestação (ÇOPUROGLU et al, 2009) .

A Reação álcali-agregado tem afetado obras de diversos portes na construção civil. Estruturas que sofreram uma ação moderada podem ser tratadas, recuperadas e monitoradas, porém, obras em situação mais grave, devem ter as estruturas afetadas substituídas (MUNHOZ, 2007).

Trata-se de uma situação que traz comprometimentos do ponto de vista ecológico e da sustentabilidade ambiental porque, a depender da solução adotada, monitoramento da estrutura afetada ou a sua substituição parcial ou total, serão consumidos grandes e vultuosos recursos.

As obras muito afetadas e que precisam ter elementos estruturais substituídos, além de consumirem novos recursos ambientais, acabam por gerar um passivo ambiental resultante da sua demolição, o qual necessita ser transportado, depositado e tratado de modo adequado, com o agravante de que o reaproveitamento destes resíduos, através da sua reciclagem, deve ser feita sob criteriosa análise e em aplicações de menor responsabilidade estrutural (sub-base de estradas vicinais, p.e.).

Além dos resíduos gerados, deve-se considerar que a estrutura em recuperação poderá permanecer fora de operação até que se conclua os reparos. No caso de hidrelétricas, isto pode significar a interrupção de geração de energia em alguma turbina, dificuldade de abertura ou fechamento de comportas, etc.

Na reconstrução das partes afetadas das estruturas deverão ser utilizados agregados e ligantes cuja combinação não contribua à ocorrência da reação álcali-agregado. Se tais materiais não estiverem próximos à obra, irão requerer o seu transporte até o

local. Este é um aspecto que demonstra a importância do estudo para viabilizar a utilização de pós de agregados reativos. No caso das grandes obras, como hidrelétricas, durante a etapa de construção, a extração de agregados se dá, via-de-regra, próxima ou no próprio canteiro de obras e o filer resultante da britagem se acumula junto aos britadores, podendo facilmente ser coletado e moído para ser incorporado ao concreto. Dessa forma, estes finos irão possibilitar a otimização do uso dos materiais próximos à unidade produtora de concreto.

#### 4.2 A UTILIZAÇÃO DE ADIÇÕES MINERAIS NA PRODUÇÃO DE CIMENTO

**A** utilização de materiais cimentícios ou de características pozolânicas, tanto naturais quanto resultantes de processos industriais, é uma prática comum há décadas, seja na produção de cimentos ou como adições ativas ao concreto. As quantidades a serem adicionadas variam em função do material e da necessidade a ser suprida (TURANLI, L.B.; UZAL B.; BEKTAS, F., 2005).

A NBR 12653-92 considera como pozolânico todo o material natural ou artificial, silicoso ou sílicoaluminoso, que por si só possui pouca ou nenhuma atividade ligante, mas que, quando finamente moído, e em presença de água, reage com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades ligantes.

A incorporação de materiais cimentícios suplementares (escória de alto forno, cinzas volantes, cinzas de cascas de arroz, metacaulin, sílica ativa, argila calcinada) melhora diversas propriedades tecnológicas dos ligantes, bem como dos materiais compósitos produzidos com a sua utilização, tais como a redução do seu calor de hidratação, redução da permeabilidade, resistência ao ataque de sulfatos e minimização da reação álcali-agregado (MUNHOZ, 2007).

Tendo a propriedade de minimizar a reação álcali-agregado, estas adições permitem a utilização de agregados locais, mesmo que reativos, evitando incremento do transporte de agregados inertes a longas distâncias, com ganhos evidentes na redução da emissão de CO<sub>2</sub>, pela queima de combustíveis fósseis, colaborando com a minimização do efeito estufa.

Outro aspecto relacionado às adições, é permitir um melhor aproveitamento das jazidas de calcário e argila, matéria primas básicas para a produção do clínquer de cimento Portland.

A argila contém alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), álcalis ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Os calcários são a fonte natural de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Se os teores destes elementos forem insuficientes, são utilizadas fontes secundárias, como a bauxita e o minério de ferro.

A otimização no aproveitamento das jazidas se dá em função de que as adições pozolânicas podem ser incorporadas diretamente ao cimento (exceto o metacaulim e a sílica ativa), otimizando a utilização do clínquer produzido.

O quadro 4.1 relaciona os teores e os tipos de materiais pozolânicos que podem ser adicionados ao clínquer. A adição destes materiais termina por gerar tipos diferentes de cimentos, com propriedades tecnológicas distintas.

O primeiro tipo de cimento produzido no Brasil foi o Cimento Portland Comum, correspondendo atualmente ao CP I, que não continha qualquer adição, a não ser o sulfato de cálcio, como regulador da pega (ABCP, 1994).

O sulfato de cálcio pode provir de diversas fontes, tais como: gipsita natural ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), do gipso nordestino ou de fontes artificiais oriundas do processo de produção de ácido fosfórico ou fluorídrico (MUNHOZ, 2007).

Com a crise de energia da década de 70, foram introduzidos os cimentos pozolânicos e de alto forno, com vistas a gerar economia nas plantas produtoras.

Na década de 90, mais propriamente em 1991, (ABCP, 1994) surgiu no mercado brasileiro o Cimento Portland Composto, que possui uma composição intermediária entre os cimentos com adições (pozolânico e alto forno) e o cimento comum (Quadro 4.1).

Estas adições proporcionam algumas vantagens tecnológicas adicionais e continuam a atender à grande maioria das aplicações dos cimentos comuns.

**Quadro 4.1** – Composição dos diferentes tipos de cimentos Portland fabricados no Brasil (ABCP, 1994)

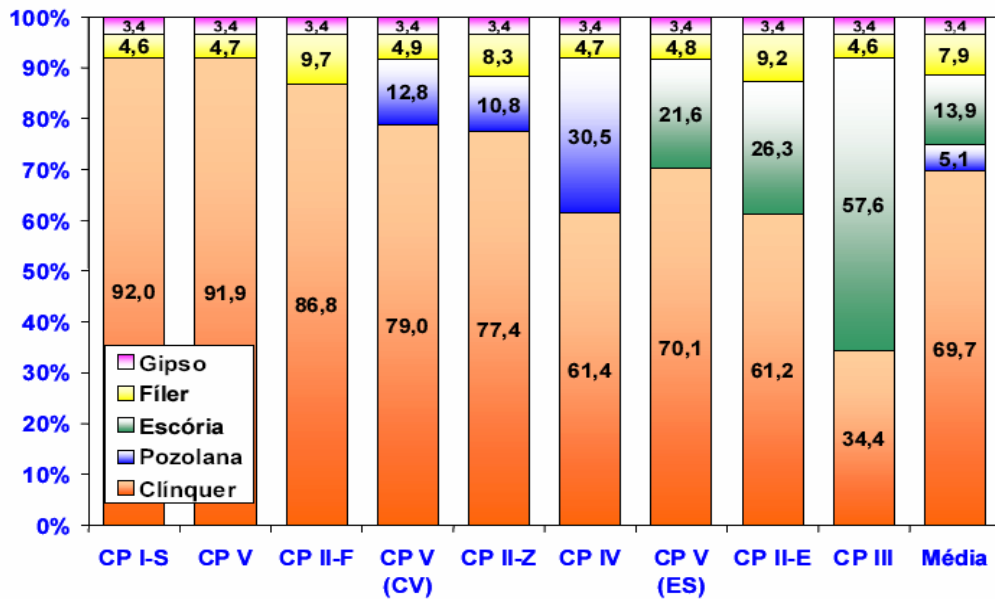
Tipo de Cimento Portland	SIGLA	Composição em Massa (%)				Norma Brasileira
		Clínquer + Sulfato de Cálcio	Escória Granulada de Alto forno (Sigla E)	Material Pozolânico (Sigla Z)	Material Carbonático (Sigla F)	
Comun	CP I	100	-	-	-	NBR 5732
	CP I-S	99-95	1-5	1-5	1-5	
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	97-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	97-90	-	-	6-10	
Alto Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
ARI	CP V ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

Munhoz (MUNHOZ, 2004 apud MUNHOZ, 2007), a partir de dados colhidos junto à Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e também junto ao Sindicato das Indústrias de Cimento (SNIC), determinou a composição média dos cimentos brasileiros em 2003. O Gráfico 4.3 sintetiza esta informação.

Para entender o impacto econômico e ambiental da utilização de adições ao cimento, basta lembrar que no seu processo de produção cada tonelada de calcário utilizada gera apenas 560 Kg de CaO, que é a verdadeira matéria prima, sendo que os outros 440 kg são liberados para a atmosfera sob a forma de CO<sub>2</sub> (BASÍLIO, 1983). O consumo energético na produção de clínquer, segundo Mehta; Monteiro (1994), é de cerca de 800 Kcal/Kg.

Turanli, L.B.; Uzal B.; Bektas, F.(2005) citando Mehta (2002), Malhotra V.M.; Mehta P.K.(2002) afirmam que a produção de cimento é um processo que consome intensivamente energia, na ordem de 4 GJ por tonelada de cimento (cerca de 956 Kcal/kg), provenientes principalmente da queima de combustível fóssil e libera cerca de 1 tonelada de CO<sub>2</sub>. Considerando a produção mundial anual, estimada em 1,6 bilhões de toneladas, concluí-se que a indústria do cimento responde por 7% de todo dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) liberado.

**Gráfico 4.3 - Composição média dos cimentos brasileiros no ano de 2003 (MUNHOZ, 2004 apud MUNHOZ, 2007).**



O SNIC, em seu relatório de 2009, ao tratar da contribuição da indústria cimenteira nacional para a redução da emissão de CO<sub>2</sub>, afirma que, se confrontados os dados de 1990 com os de 2005, houve uma redução de 13,3% na emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzida. Este valor caiu de 428 kg/ton cimento para 371 kg/ton cimento. Em termos de utilização de energia térmica, são consumidas cerca de 653 kcal/kg. Dentre as ações estratégicas adotadas pela indústria cimenteira estão a modernização das plantas, mudança da matriz energética e a ampliação da produção de cimentos com adições (SNIC, 2009). Em termos mundiais, a indústria cimenteira passou a responder por apenas 5% de todo CO<sub>2</sub> produzido pelo homem (SNIC, 2009b).

Dessa forma, passa a ser relevante, dentro de uma estratégia de produção e utilização sustentável do cimento, incentivar a identificação de novos materiais pozolânicos que possam ser incorporados diretamente ao cimento ou utilizados na preparação do concreto.

Outro aspecto a ser observado, é que a utilização do material pulverulento proveniente da britagem do basalto significa, não somente a recuperação do recurso natural em si, que passa a ter um fim útil, mas torna o processo energeticamente

mais eficiente, possibilitando a recuperação da parcela de energia gasta na sua geração.

### 4.3 O BASALTO

**D**evido a sua resistência e a sua densidade, o basalto é considerado um agregado de alta performance para concreto de cimento Portland e betuminoso. Complementam esta qualificação a sua "refratariedade", resistência a meios agressivos e resistência à abrasão (ÇOPUROGLU et al, 2009).

O Brasil tem um dos maiores derrames basálticos do mundo, localizado em duas regiões: Bacia do Paraná e outro de menor porte na Região Norte. Conforme relatado por Rüegg; Amaral (1976), somente os derrames de basalto da Bacia do Paraná compreendem cerca de  $1,2 \times 10^6 \text{ km}^2$ , o que representa quase 1% do total de terras emersas do planeta. Em termos de volume, estas rochas contabilizam, segundo Leinz et al (apud RÜEGG; AMARAL, 1976), cerca de  $6,5 \times 10^5 \text{ km}^3$ . Dessa forma, é evidente que há um potencial elevado para a exploração econômica desta rocha, o que deve ser feito de forma racional e sustentável.

Os basaltos, complementarmente, constituem o tipo de rocha mais comum encontrado na superfície terrestre. São rochas vulcânicas, oriundas da solidificação de lava de baixa viscosidade, depositada sobre a crosta terrestre. São compostos, em média, por quartzo (0% a 20% em volume) ou olivina (0% a 10%), k-feldspatos (>35%) e plagioclásio rico em anortita. O quartzo e a olivina não são encontrados simultaneamente na mesma rocha. A natureza dos minerais componentes e a sua proporção varia de camada a camada nos derrames basálticos (WILLIAMS et al, 1970). Quando o basalto é desprovido de olivina, ou muito pobre neste mineral, é considerado uma variedade supersaturada ou saturada em sílica.

Os basaltos predominam entre as lavas que deram origem aos grandes platôs, como é o caso do Deccan (Índia), Oregon e Washington (Estados Unidos da América) e a Bacia do Paraná.

De acordo com Williams et al (1970) a textura dos basaltos pode variar de vítrea<sup>1</sup> a holocristalina<sup>2</sup>, sendo a mais comum a intergranular<sup>3</sup>. A textura porfirítica<sup>4</sup> também é comum, ocorrendo principalmente quando a lava tem um histórico de resfriamento rápido, sendo que os fenocristais<sup>5</sup> podem ser formados por plagioclásio ou piroxênio. Caso ocorra a flutuação dos fenocristais, a textura torna-se glomeroporfirítica<sup>6</sup>. Esta ocorrência é mais comum às partes inferior e superior dos derrames e em sills<sup>7</sup> espessos. Os basaltos distinguem-se, entre as rochas vulcânicas, por apresentarem uma matriz finamente granulada, variando desde fina a afanítica.

De acordo com a classificação proposta por Le Maitre para as rochas ígneas (LE MAITRE apud KORKANÇ, M. e TUGRUL, A. 2005), as rochas com o teor de sílica (SiO<sub>2</sub>) situado entre 45% e 52% e teor de óxidos de sódio e potássio (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) até 5% são classificadas como basalto.

Comparativamente, o basalto é rico em magnésio e ferro, o que lhe confere uma aparência escura e uma massa específica que pode alcançar cerca 3,2 g/cm<sup>3</sup>.

O levantamento pioneiro efetuado por Rüegg; Amaral (1976) identificou variações regionais da composição química das rochas basálticas da Bacia do Paraná.

Foram realizadas cerca de duzentas e trinta e seis análises, quantificando 8 tipos diferentes de espécies químicas (SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe-total, MgO, CaO, K<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O). Os resultados foram modelados estatisticamente através do método das superfícies de tendências e, embora os resultados do coeficiente de correlação tenham sido considerados de "força intermediária", foi possível identificar quatro regiões com características geoquímicas distintas.

---

<sup>1</sup> Vítrea: quando é composta por vidro vulcânico, resultante do resfriamento rápido dos derrames e de uma viscosidade elevada que impede a migração de íons (WILLIAMS et al, 1970).

<sup>2</sup> Holocristalina: quando a rocha é composta inteiramente por cristais e sofreu um resfriamento mais lento (WILLIAMS et al, 1970).

<sup>3</sup> Intergranular: quando os interstícios angulares entre os feldspatos estão ocupados por grânulos ferromagnesianos, usualmente olivina, piroxênio ou minério de ferro, orientados ao acaso (WILLIAMS et al, 1970).

<sup>4</sup> Porfirítica: quando a "rocha é constituída por minerais com duas granulometrias distintas, minerais grandes e pequenos" (MOTOKI, A., 2004).

<sup>5</sup> Fenocristais: cristais grandes que jazem em uma matriz de granulação fina ou vítrea (WILLIAMS et al, 1970).

<sup>6</sup> Glomeroporfirítica: textura na qual os fenocristais estão reunidos em grupos distintos (WILLIAMS et al, 1970).

<sup>7</sup> Sills: são corpos intrusivos tabulares que se alojam paralelamente às estruturas originais das rochas sedimentares encaixantes (TEIXEIRA, W. et al (Org.), 2009).

Estas regiões foram denominadas de “anomalias”, pelo fato de suas características geoquímicas diferirem significativamente da média da bacia como um todo. A tabela 4.1 ilustra estas diferenças.

Como pode ser inferido da tabela 4.1, as regiões I e IV têm como característica comum altos teores de sílica e álcalis e baixas concentrações de ferro total, magnésio e cal e se distinguem pelo tipo predominante de álcali.

As rochas da região I são mais potássicas e as da região IV são mais sódicas. Como pode ser inferido da tabela 4.1 as regiões I e IV têm como característica comum altos teores de sílica e álcalis e baixas concentrações de ferro total, magnésio e cal e se distinguem pelo tipo predominante de álcali.

Por outro lado, as regiões II e III têm em comum o fato de apresentarem teores de sílica e álcalis iguais ou inferiores à média da bacia.

**Tabela 4.1** – Composição geoquímica das rochas basálticas de quatro regiões, anomalias, identificadas na Bacia do Rio Paraná (Rüegg; Amaral, 1976).

Região	N	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
I	25	54,94	1,44	13,06	9,22	0,15	2,88	5,60	2,89	2,69
II	25	48,96	2,78	13,19	15,38	0,20	5,47	8,29	2,32	1,26
III	54	49,18	3,17	13,34	14,61	0,22	4,63	8,47	2,70	1,40
IV	13	53,76	2,94	13,91	12,15	0,18	3,31	6,36	3,25	2,53

Obs: Região I: Centro-leste riograndense; Região II: Centro-oeste paranaense; Região III: Centro-leste paulista; Região IV: Litoral Norte do Estado de São Paulo. N: nº de amostras analisadas dentro do limite de cada região.

Os dados, após a modelagem estatística, permitiram delimitar geograficamente estas quatro regiões. Embora exista uma grande área de fronteira entre elas, é possível ter uma idéia das variações regionais dentro do mesmo tipo litológico. A figura 4.1 identifica estas quatro regiões.

#### 4.4 OS BASALTOS DO NORTE DO PARANÁ

**A** região Norte do Paraná faz parte da Bacia sedimentar do Paraná, que ocupa o centro-leste da América do Sul, abrangendo cerca de 1.600.000 km<sup>2</sup>, dos quais 1.000.000 km<sup>2</sup> em território brasileiro. A maior parte dos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina (regiões central e ocidental) e Rio Grande do sul (regiões norte, central e ocidental) situam-se nesta bacia.

A bacia do Paraná pode ser dividida nas seguintes sub-bacias: a)Alto Paraná; b)Paranaense-Catarinense; c)Uruguiaia-Sul-Rio-Grandense; d)Chaco-Paraná; e)Ocidental (PETRI & FULFARO, 1983).

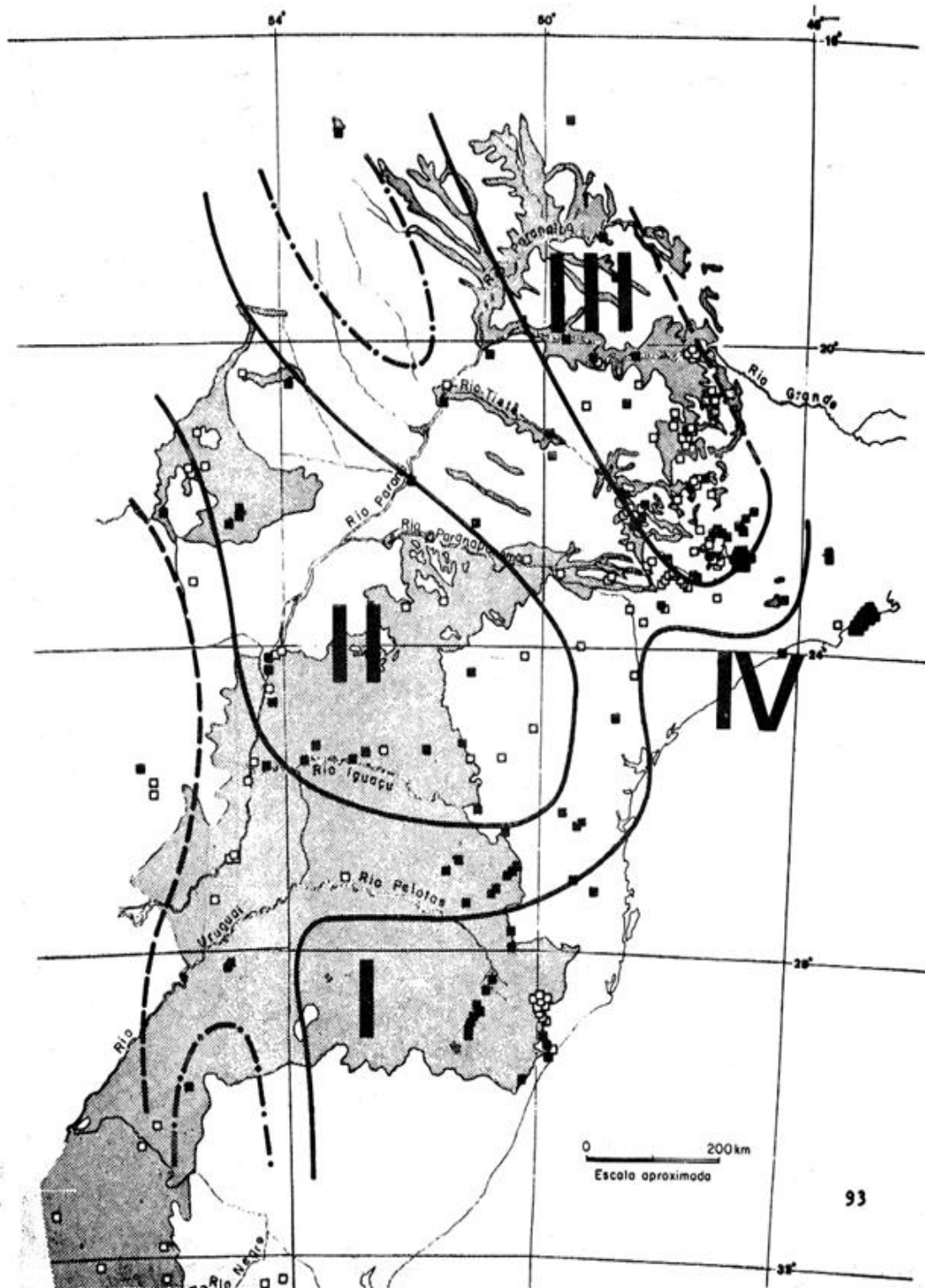
As atuais características da Bacia do Paraná estão definidas desde o período Devoniano, ou Siluriano, tendo perdurado como bacia subsidente<sup>8</sup> até o fim do Mesozóico. Este comportamento tectônico propiciou condições favoráveis à ocorrência da sedimentação em ambientes os mais diversificados, recobertos em grande parte, pelo espesso pacote vulcânico representado pelas rochas basálticas da Formação Serra Geral, as quais correspondem à unidade geológica de maior importância para os projetos de engenharia ligados à geração de energia (BARTORELLI, 1983).

As rochas basálticas são os constituintes majoritários do substrato das grandes estruturas de concreto das barragens da Bacia do Paraná. Estas caracterizam-se por seqüências de sucessivos derrames de lava com espessuras individuais variando de menos de dez metros a várias dezenas de metros (BARTORELLI, 1983).

---

<sup>8</sup> Subsidiência: movimento vertical descendente das placas tectônicas ao longo do tempo geológico (TEIXEIRA, W. et al (Org.), 2009).

**Figura 4.1** – Bacia do Paraná: Subdivisão do Basalto em 4 regiões geoquimicamente diferentes. Região I: Centro-leste riograndense; Região II: Centro-oeste paranaense; Região III: Centro-leste paulista; Região IV: Litoral Norte do Estado de São Paulo. (Rüegg; Amaral, 1976).



O vulcanismo básico está relacionado ao processo definitivo da deriva continental e ocorreu em um ambiente continental de características desérticas. A Bacia do Paraná foi afetada mais intensamente pelo tectonismo no transcorrer do Eon Fanerozóico, durante a reativação Juro-Cretácea, responsável por extensos fraturamentos da crosta, que permitiram acesso ao grande volume de lavas basálticas provenientes do manto superior. No topo, os derrames mostram incipiente diaclasamento horizontal e caracterizam-se por conter inúmeras vesículas e/ou amígdalas, preenchidas por minerais como quartzo, calcita, zeólitas e argilominerais (BARTORELLI, 1983).

Petrograficamente, estes derrames são constituídos por materiais que vão desde basalto toleítico a plagioclásio e aegorina-augita, com variações para termos mais ácidos no sul do Brasil, onde são encontrados riodacitos, quartzolátitos, etc.

É bastante comum a presença de argilas expansivas na constituição das rochas, o que tem se constituído em impedimento à utilização de alguns basaltos como material de enrocamento ou como agregados (BARTORELLI, 1983).

Observando a figura 4.2, um mapa que registra a extratigrafia da região, pode-se concluir que as regiões Norte e Noroeste do Paraná não diferem quanto a sua origem geológica, embora sejam encontrados basaltos com diferentes colorações, que variam de cinza escuro a cinza mais claro. Esta característica está relacionada ao histórico de resfriamento das lavas, que podem ser agrupadas em províncias geoquímicas distintas.

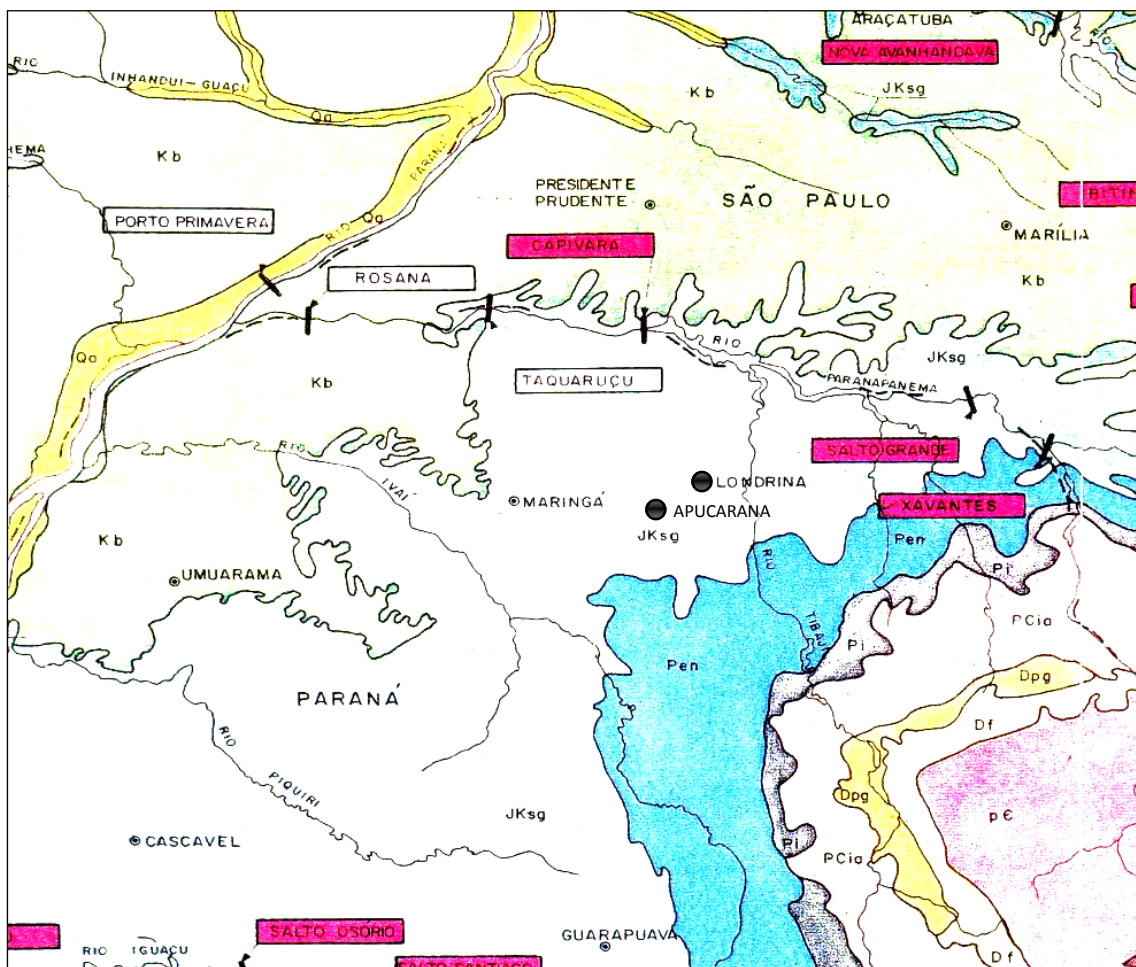
#### 4.5 COMPORTAMENTO REATIVO DO BASALTO

**A** origem e a natureza de um agregado têm papel decisivo quanto a sua reatividade. O basalto, por causa do seu baixo teor de  $\text{SiO}_2$  livre, é enquadrado, algumas vezes, no grupo de rochas inócuas em relação à reação álcali-agregado. Podem ocorrer variações consideráveis no potencial para RAS, refletindo diferenças na composição geoquímica (principais espécies químicas presentes) ou modal-mineral (principais minerais que compõem a rocha), bem como de sua história geológica. As variações dentro de um mesmo tipo litológico podem

ocorrer entre diferentes localizações ou dentro de uma mesma lavra (MAIZA, P. J.; MARFIL, S. A., 1998).

Batic, O. R.; Sota, J. D.; Maiza, P. J.(1992) chamam atenção para o fato de que fatores como porosidade, deformações originadas de estresses, diferenças de temperatura de cura durante a formação da jazida, tamanho dos cristais e contaminação com outros minerais (montmorilonita, p. e.) são alguns dos fatores que devem ser considerados na avaliação das jazidas antes de iniciar a sua exploração.

**Figura 4.2** - Geologia do Norte e Noroeste do Paraná. Fonte: Bartorelli A. (1983).  
 Legenda: Kb (Grupo Bauru), JKsg (Formação Serra Geral), Pen (Formação Estrada Nova), Pi (Formação Irati), PCia (Formação Itararé-Aquidauna), Df (Formação Furnas), PC (Pré-Cambriano), Qa (Aluviões em geral).



Quando o basalto apresenta uma matriz vítrea, esta é termodinamicamente instável e tende a se cristalizar com o tempo (WILLIAMS et al, 1970). Este processo é conhecido como desvitrificação e resulta na formação de intercrescimentos de tridimita/cristobalita (BROEKMANS, M. A. T. M.; 2004; MAISA, P.J., 2006), dando causa à redução de seu volume líquido. Esta retração cria nanocanais na matriz vítrea permitindo o acesso de fluidos (ÇOPUROGLU et al, 2009). Outro fenômeno associado refere-se ao processo de argilização, que origina a argilominerais, tais como montmorilonita e caulinita (MARFIL, S. A., 2005; MAISA, P.J., 2006).

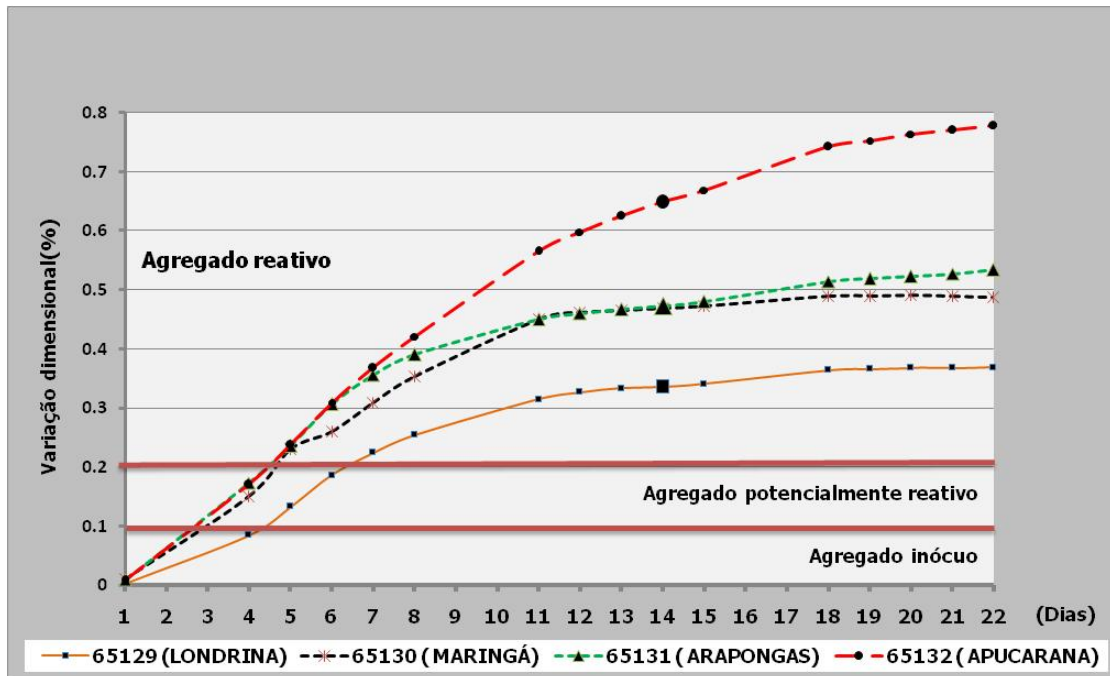
Há estudos que descrevem a reatividade do basalto em diversos níveis, desde altamente reativos a inócuos. É o caso dos trabalhos de Castro et al (1997), Salles et al (1997), Marfil et al (1998), Korkanç M. e Tugrul A. (2005), Marfil et al (2005) Valduga, L. (2006), Katayama (apud ÇOPUROGLU, 2009) e Shayan (apud ÇOPUROGLU, 2009).

Filla, J. C.; Pozzenato, C. M.; Morales, G.(em fase de elaboração)<sup>9</sup> analisando amostras de basalto coletadas em pedreiras no norte e noroeste do Paraná encontraram comportamentos distintos em relação à RAS. O gráfico 4.4 demonstra as diferenças de comportamento identificadas.

---

<sup>9</sup> FILLA, J. C.; POZZENATO, C. M.; MORALES, G. Avaliação da susceptibilidade de postes de concreto moldados com agregados basálticos e cimento de alta resistência inicial à reação álcali-sílica. A ser publicado.

**Gráfico 4.4 -** Indicação da variação dimensional das barras de argamassa confeccionadas com amostras de agregado basáltico ensaiadas segundo a metodologia ASTM C-1260. Amostras: 65129: Londrina; 65130: Maringá; 65131: Arapongas; 65132: Apucarana.



Esta diversidade de relatos, quanto ao comportamento do basalto frente aos álcalis do cimento, encontra algumas justificativas descritas na literatura:

- Os basaltos passam a ter um comportamento reativo com os álcalis a partir de um certo teor de  $\text{SiO}_2$ . Alguns pesquisadores admitem que a reatividade ocorra mais intensamente quando o teor de  $\text{SiO}_2$  ultrapasse a marca de 50% na composição total das principais espécies químicas presentes (KATAYAMA et al, apud KORKANÇ, 2005). Çoporuglu (2009) sugere um valor bem superior, ao redor de 70%, para que a reação se torne deletéria. Neste caso, de acordo com a classificação geoquímica, já não se trata de basalto, mas sim de um tipo de riolito (MOTOKI, A., 2004).
- A utilização de cimentos contendo adições (pozolana, escória, p. e.) na realização dos ensaios pode ter inibido a ocorrência de expansões e induzido a considerar diversas amostras de basalto como inócuas, considera Valduga (2006);
- Um dos métodos mais utilizados na verificação da reatividade é a ASTM C-1260. Este método, incorporado à norma brasileira NBR 15.577, pode apresentar

distorções, tanto em função da agressividade do tratamento quanto pelas suas condicionantes. Agregados considerados inócuos, quando observados utilizando outros métodos, que não a ASTM C-1260, revelaram um caráter reativo (VALDUGA, 2007);

- A presença de argilominerais do tipo montmorilonita, em função de suas propriedades expansivas, provoca aumento da permeabilidade, o que facilita os processos químicos que conduzem à RAS. Estes minerais ocupam os espaços intergranulares, como conseqüência do processo de desvitrificação do vidro vulcânico (MARFIL, S. A. et al , 2005).

Salles e Oliveira (1997), analisando amostras de basalto provenientes de três barragens construídas pela CESP (Água Vermelha, Taquaruçu e Três Irmãos), fazem uma constatação interessante: muito embora a composição mineralógica revelada pela análise petrográfica tenha indicado uma grande semelhança, o comportamento em relação à reatividade com os álcalis do cimento foi distinto.

Em linhas gerais, considera-se que o caráter deletério do basalto é controlado pela presença de vidro vulcânico em sua matriz, existência de minerais de alteração e teor de SiO<sub>2</sub>. As variações nestes parâmetros irão refletir na intensidade da reação com os álcalis (KORKANÇ, 2005; MARFIL, et al; 1998).

Marfil et al (1998) estudaram 17 amostras de basalto, provenientes de diversas regiões da Argentina, utilizando os métodos ASTM C-289 para a determinação do teor de sílica dissolvida, ASTM C-1260/94 para avaliação das expansões geradas e espectrometria por indução de plasma (ICP) na determinação dos teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O, MgO, TiO<sub>2</sub> e MnO.

Os autores concluem, analisando os resultados através do método estatístico dos componentes principais, que a expansão está estreitamente relacionada ao teor de sílica dissolvida, a qual é proveniente dos componentes deletérios do basalto, especialmente vidro vulcânico, materiais de alteração e sílica pobremente cristalizada (amorfa).

Em adição, Marfil, S.A.; Maiza, P.J. (19--?), ao estudarem as características petrográficas e mineralógicas de basaltos da Meseta de Somuncura na Província de

Rio Negro escreveram: “[...] O processo de devitrificação leva invariavelmente à cristalização de argilas tipo montmorilonita, já que o mesmo se desenvolve em um meio de certa alcalinidade [...]”, cuja presença foi relacionada à ocorrência da RAS.

Contudo, conforme salientado por Batic, O. R.; Sota, J. D. ; Maiza, P. J. (1992), em seu estudo de agregados basálticos frente a cimentos de alto e baixo teores de álcalis, a expansão observada nas barras de argamassa não pode ser creditada ao simples inchamento da montmorilonita, mas sim a sua participação nas reações químicas.

A montmorilonita, assinalam os pesquisadores, tem uma participação ativa no desenvolvimento da RAS em função de sua desintegração, que libera para a solução presente nos poros do concreto, sílica e álcalis, através do mecanismo de troca catiônica. Os autores consideram, a partir dos resultados de seu estudo, que agregados com teor de montmorilonita superior a 3% devem ser considerados potencialmente reativos.

Marfil et al (2005), estudando a correlação existente entre o teor de montmorilonita, sílica dissolvida e a expansão de barras de argamassa moldadas com agregados basálticos, concluíram, aplicando o método estatístico dos componentes principais, que há uma boa correlação entre os fatores estudados. A tabela 4.2 registra os dados correlacionados no estudo e o gráfico 4.5 resume as constatações.

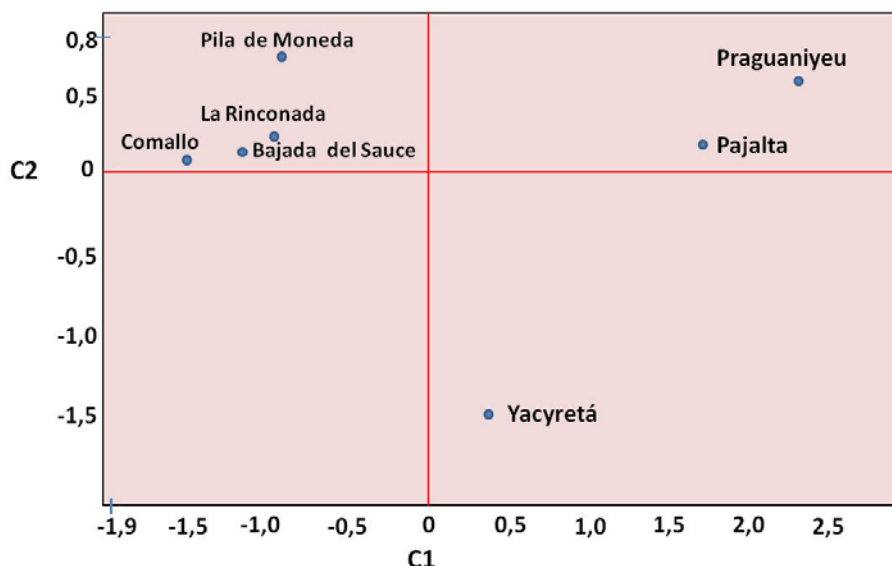
Neste gráfico é possível perceber a formação de dois grupos distintos de rochas em relação à componente C1. A componente C1 concentra de forma homogênea a influência do teor de montmorilonita, teor de sílica dissolvida e da expansão. Esta componente é responsável por explicar 82,02% de toda a variabilidade e está intimamente relacionada ao teor de montmorilonita ( $R=0,91389$ ) e à expansão ( $R=0,97895$ ).

**Tabela 4.2** - Expansão, teor de sílica dissolvida e porcentagem de montmorilonita nos basaltos estudados provenientes das províncias argentinas de Rio negro (RN), Neuquen (N) e Misiones (M) (MARFIL et al, 2005)

Amostra	Expansão aos 28 dias -ASTM C - 1260 (%)	Sílica dissolvida ASTM C-289 (mg)	Teor de montmorilonita (%)
COMALLO (RN)	0,070	7,27	4,8
BAJADA DEL SAUCE (RN)	0,054	15,70	6,6
PILA DE MONEDA(N)	0,010	35,73	7,3
LA RINCONADA (N)	0,041	24,17	7,7
PAJALTA (RN)	0,603	67,40	15,6
PRAGUANIYEU (RN)	0,673	86,44	15,8
YACYRETÁ	0,407	38,10	16,6

O grupo de amostras situado no quadrante que contém valores positivos de C1 foi identificado como potencialmente reativo em estudos prévios do mesmo autor. Desta forma, consegue-se demonstrar a estreita relação entre a ocorrência de expansões e a presença de montmorilonita. O grupo posicionado no quadrante cujas abscissas correspondem a valores negativos de C1 foram considerados inócuos em relação à RAS em estudos anteriores.

**Gráfico 4.5** – Distribuição das amostras de basalto estudadas no plano das variáveis principais C1 e C2. Adaptado de Marfil et al, 2005.



Marfil, S. A. et al (2005) relatam ainda que, em um estudo realizado em 1998 para identificar a patologia responsável pela deterioração de uma barragem de concreto onde ocorriam processos expansivos, foi identificada a ocorrência de RAS e, nos sítios estudados, ao redor do agregado de origem basáltica se desenvolvia um acentuado processo de argilização com abundante formação de montmorilonita e clorita em menor proporção.

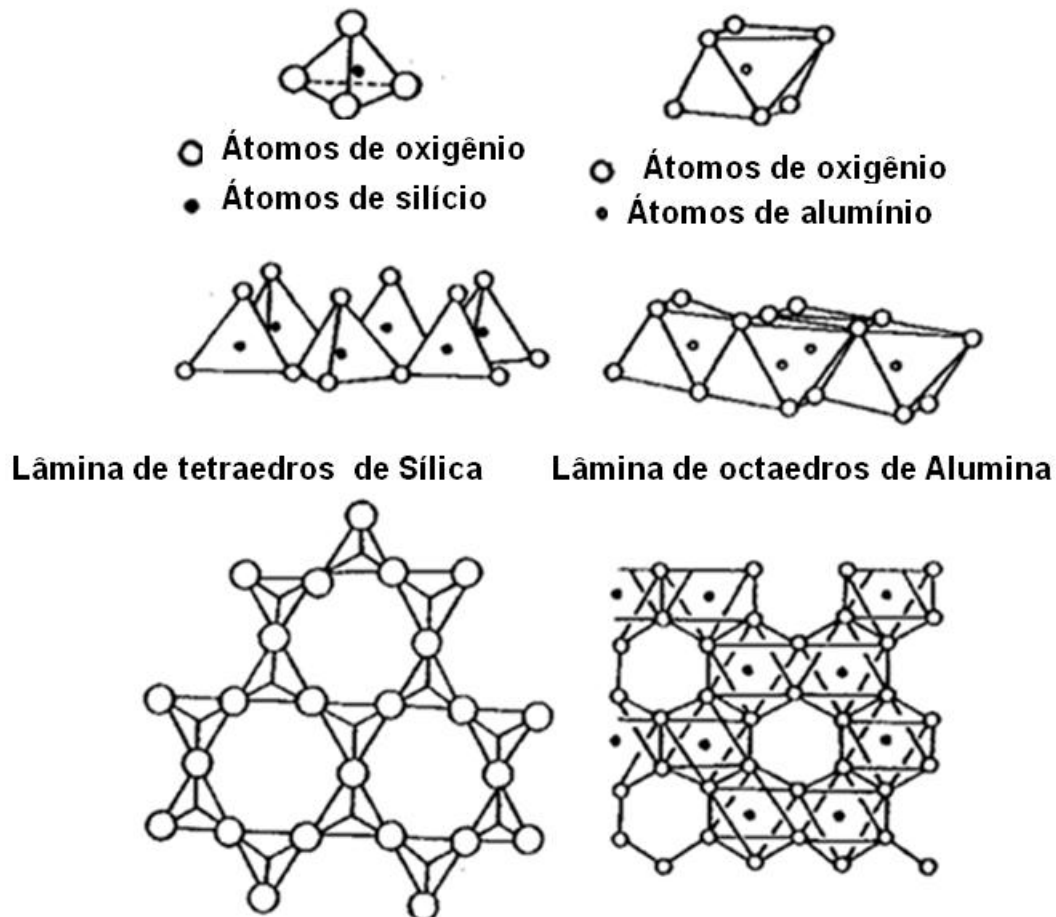
Estas constatações induzem à introdução de considerações sobre os argilominerais do grupo das esmectitas e as montmorilonitas propriamente ditas.

#### 4.6 ARGILOMINERAIS: ESMECTITAS E MONTMORILONITAS

**O**s argilominerais são filossilicatos de alumínio/magnésio hidratados, resultantes da combinação de duas unidades estruturais básicas, sendo uma delas um tetraedro de sílica e a outra um octaedro de alumina. (PERGUER, S. B. C. et al, 1999; VIDAL, 2009)

Os tetraedros de sílica combinam-se indefinidamente formando uma lâmina de sílica. A combinação dos octaedros constitui uma lâmina chamada de gibsita (Figura 4.3).

**Figura 4.3** - Unidades estruturais dos argilominerais. Adaptação de (SOUZA, S. P.; 1975 apud PERGUER, S. B. C. et al, 1999)



A depender da proporção em que estas lâminas estão agrupadas surgem diferentes tipos de argilominerais. Caso a combinação esteja na proporção 1:1, ou seja, uma lâmina de sílica combinada a uma lâmina de gibsita, forma-se através da repetição desta seqüência, o argilomineral denominado de Caulinita. Se a combinação for do tipo 2:1, onde ocorre a intercalação de duas lâminas de sílica por uma lâmina de gibsita, pode-se dar origem a dois tipos de argilominerais. Caso as camadas de sílica se apresentem unidas por cátions de potássio têm-se o argilomineral illita. Se entre as camadas de sílica houver abundante quantidade de moléculas de água têm-se o argilomineral montmorilonita que, de acordo com a classificação proposta por Grim

(1968 apud CARDOSO, 2005), é sinônimo de esmectita, que é descrito como um mineral cristalino, composto por três camadas, expansível e equidimensional.

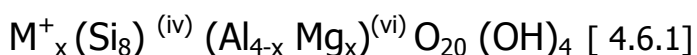
Os cátions de potássio que unem as camadas de sílica no caso da illita, tem a sua carga positiva equilibrada, em decorrência da substituição de alguns átomos de alumínio por silício nas lâminas tetraédricas. No caso da montmorilonita, ocorre a substituição isomorfa<sup>10</sup> de magnésio e ferro por alumínio nas lâminas octaédricas.

De um modo geral, as esmectitas possuem carga elétrica negativa em suas superfícies basais como resultado da substituição isomorfa. Nas bordas, ou arestas, em função da ruptura na continuidade da estrutura, as cargas predominantes são positivas (CARDOSO, J. J. B., 2005).

De acordo com Silva A.R.V.; Ferreira H.C. (2008), cerca de 80% dos cátions trocáveis na montmorilonita estão alojados nos espaços interplanares, ou galerias, e cerca de 20% se encontra nas superfícies laterais.

As principais características das montmorilonitas são: a) São partículas muito finas; b) Elevada carga superficial; c) Alta capacidade de troca catiônica; d) Elevada área superficial; e) Inchamento (Afastamento das camadas) quando em presença de água.

A montmorilonita, que dá o nome ao grupo, é a esmectita mais conhecida e abundante, possuindo a seguinte fórmula química genérica:



Onde:

$M^+_x$  representa os cátions intercambiáveis e X é a carga da Lâmina ( $0,6 < x < 1,2$ )

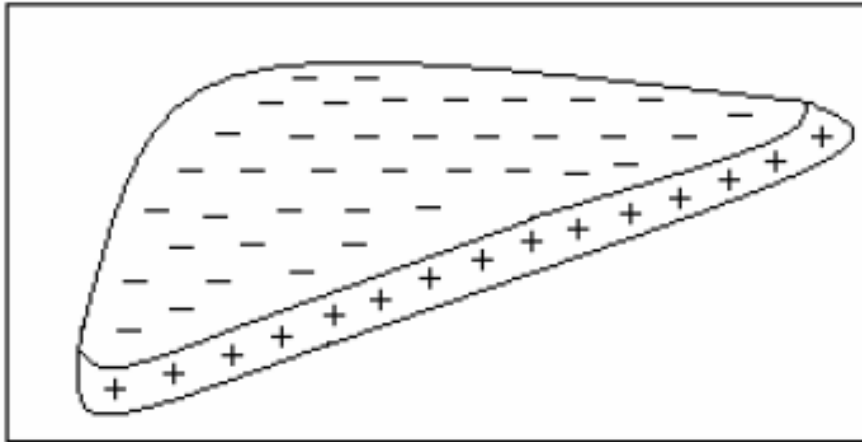
Em tese, a fórmula química da célula unitária da montmorilonita pode ser aproximada para:



A figura 4.4 ilustra uma placa de esmectita (montmorilonita) e a distribuição das cargas superficiais.

<sup>10</sup> Substituição isomorfa: é a substituição de um elemento por outro sem nenhuma alteração na forma cristalina. (DAS, B. M., 2007).

**Figura 4.4** - Representação morfológica de uma esmectita (montmorilonita) evidenciando a distribuição das cargas sobre a sua superfície. Figura adaptada de Chagas (2005 apud VIDAL, 2009).

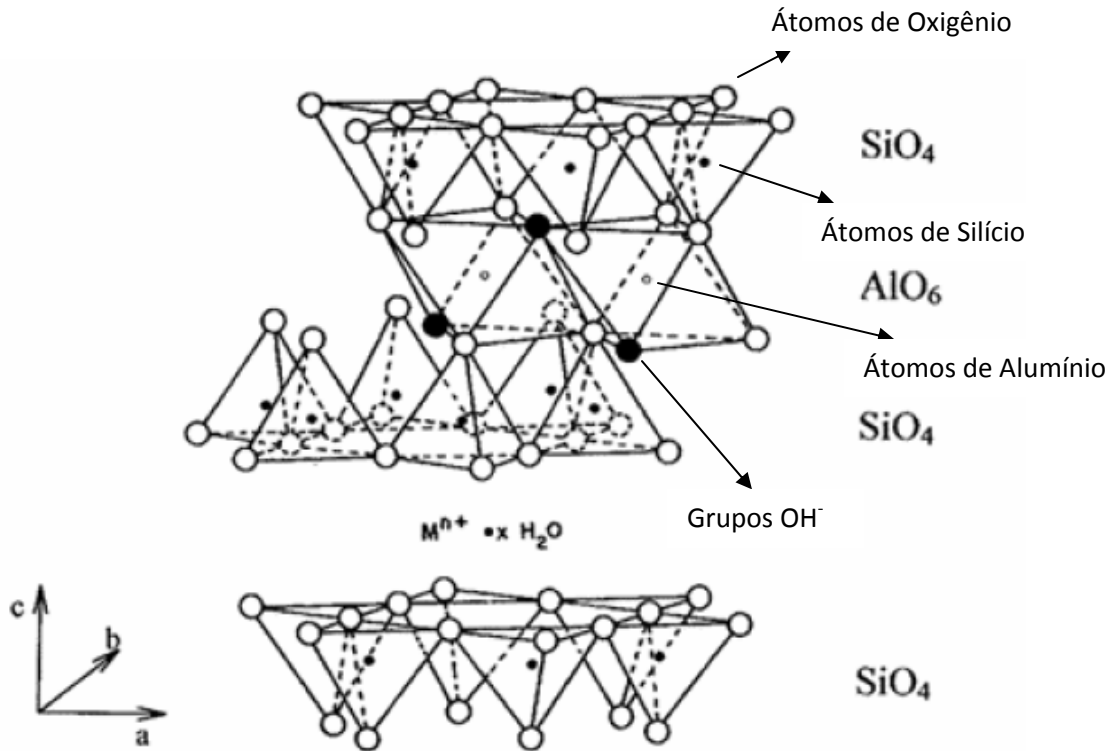


A figura 4.5 extraída de Perguer, S. B. C. et al (1999) é uma representação ideal da estrutura de uma esmectita 2:1. Conforme representado, as lâminas crescem no plano estabelecido pelos eixos cristalográficos "a" e "b" e se empilham ordenadamente, ou não, na direção do eixo "c".

A capacidade de hidratação é a principal propriedade das esmectitas. As camadas que formam as esmectitas são dispostas de tal maneira a sempre permitirem a penetração de água ou a troca iônica. (LUCKHAM; ROSSI 1999 apud VIDAL, 2009).

A hidratação das esmectitas conduz a um processo de inchamento que ocorre em duas etapas, de acordo com Cardoso, J. J. B. (2005). A primeira etapa é o inchamento cristalino, causado pela hidratação dos cátions intercambiáveis da argila seca. A segunda etapa é o inchamento osmótico que deriva da diferença de concentração entre os íons catiônicos adsorvidos a sua superfície e aqueles presentes no fluido ao seu redor. O inchamento cristalino tem um alcance limitado (1 nm), enquanto o inchamento osmótico pode levar à completa desagregação das lâminas dos filossilicatos.

**Figura 4.5-** Estrutura idealizada de uma esmectita 2:1 (montmorilonita), adaptada de Perguer, S. B. C. et al (1999)

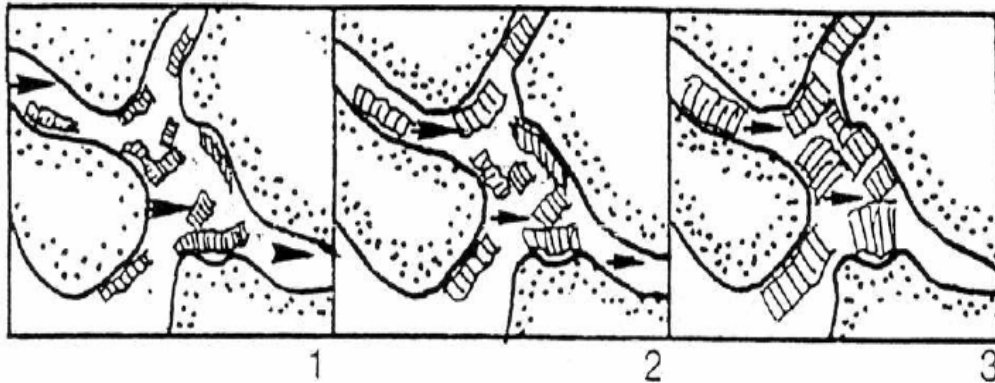


A expansão das esmectitas em um meio poroso leva a uma drástica redução da porosidade e da permeabilidade. Civan (2000 apud CARDOSO, J. J. B., 2005) demonstra o mecanismo de redução da permeabilidade na figura 4.6. Conforme destacado, o primeiro passo (1) consiste na percolação do fluido pelos espaços capilares, seguido da (2) interação com os minerais de argila que resulta na expansão destes e, conseqüente obstrução dos espaços e interrupção do fluxo de fluidos (3), levando à redução da permeabilidade do meio.

O inchamento osmótico das esmectitas é alvo de grande preocupação e tem levado a diversos estudos a fim de desenvolver substâncias que possam controlá-lo. Via-de-regra, um dos setores mais preocupados com este fenômeno, é o de exploração de petróleo, pois pode levar à quebra de equipamentos (brocas, p. e.) durante o processo de perfuração de poços, quando se atravessa camadas de filossilicatos ou à obstrução de meios porosos impedindo a retirada de petróleo e gases naturais. Uma

aplicação positiva deste fenômeno diz respeito ao controle e isolamento de depósitos de resíduos radioativos.

**Figura 4.6** - Representação esquemática do modo como ocorre a redução da porosidade e da permeabilidade em função do inchamento das esmectitas. Civan (2000 apud CARDOSO, J. J. B., 2005)



Slade, P. J. et al (1991) relatam que o inchamento cristalino de esmectitas pode ser controlado pela concentração de eletrólitos da solução na qual está dissolvida, associado à carga superficial das lâminas. Dessa forma, o aumento da concentração de eletrólitos na solução reduz o seu inchamento, bem como o aumento da sua carga superficial.

Há diversos inibidores da hidratação de esmectitas, tanto inorgânicos quanto orgânicos. Os inibidores inorgânicos mais comuns, e também os mais acessíveis, são sais de cátions monovalentes como o cloreto de sódio (NaCl) ou cloreto de potássio (KCl) ou bivalentes como o cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>).

Os cátions tendem a ficar entre as camadas de argila e evitam a sua hidratação (FARIAS, 2006 apud VIDAL, 2009). Cada um destes sais possui uma concentração crítica, a partir da qual não se observa o aumento da distância interplanar e, conseqüentemente, o inchamento (CARDOSO, 2005).

Cardoso (2005) relata ainda que estes sais também foram eficientes para inibir o inchamento osmótico, sendo o CaCl<sub>2</sub> o mais eficiente.

Esta constatação reforça a afirmação de Batic, O. R.; Sota, J. D.; Maiza, P. J. (1992) quanto à importância menor do inchamento das esmectitas na expansão das barras de argamassa moldadas com agregados basálticos e cimentos de alto e baixo teor de álcalis. Muito provavelmente o seu inchamento foi inibido pela elevada concentração de cátions de sódio na solução utilizada na cura agressiva (0,1 N de NaOH) no ensaio ASTM C-1260.

Além do inchamento, a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) é outra propriedade importantíssima no contexto em que ocorrem os argilomineais e nas suas aplicações.

A CTC é definida como o excesso de contra-íons na região adjacente à superfície dos colóides. É uma troca cátion-por-cátion entre a unidade estrutural do argilomineral e a solução aquosa que contém o cátion de maior atração ou ainda a habilidade relativa das argilas em carregar cátions trocáveis. (CARDOSO, J. J. B., 2005).

Os cátions trocáveis são agrupados de acordo com a facilidade de realizar a troca. Esta facilidade é função, primeiramente, do número de oxidação do metal ou metal alcalino terroso e, secundariamente, do seu raio atômico. Em ordem de reatividade decrescente, tem-se os seguintes cátions:  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  e  $\text{Ba}^{2+}$ .

Teixeira, R.S.; Pinese, J. P. P.(2006), estudando a viabilidade da utilização da camada superficial do solo de Londrina como material de base e compactação de aterros, referem-se à CTC como sendo:

[...] a quantidade máxima de bases trocáveis que podem ser fixadas, uma vez que o poder de adsorção de íons do solo se deve ao fato de as partículas minerais coloidais argilosas terem carga negativa e por isto apresentarem a capacidade de fixar de maneira reversível os cátions ( $\text{H}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc), dissolvidos na água [...]

Dessa forma, as esmectitas possuem, como uma de suas características principais, além do alto poder de inchamento, de até 20 vezes seu volume inicial, atingindo espaços interplanares de até 100 Å e elevada área de superfície (até 800 m<sup>2</sup>/g) a capacidade de troca catiônica (CTC) na faixa de 60 a 170 meq/100g. (CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL, CETEM, 2008).

A título de comparação, a tabela 4.3 relaciona a CTC de outros argilominerais em comparação à esmectita.

**Tabela 4.3-** Capacidade de troca catiônica de alguns argilominerais (PIMENTA, 1995 apud CARDOSO, J. J. B., 2005)

ARGILOMINERAL	CTC (meq / 100 g argilomineral)
CAULINITA	3 a 15
ESMECTITA	80 a 150
ILITA	10 a 40
CLORITA	10 a 40

A CTC depende de condições ambientais e dos argilominerais, tais como descritas por Fontoura et al. (2008 apud VIDAL, 2009: a) Desequilíbrio iônico gerado por substituições isomórficas; b) Ligações químicas partidas dos íons superficiais do cristal; c) Substituição iônica das hidroxilas;

## 4.7 A REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

### 4.7.1 Histórico

O primeiro relato disponível na literatura envolvendo danos causados pela reação álcali-sílica foi publicado em 1940 por Stanton (ACI, 1998), registrando a deterioração de diversos pavimentos rodoviários na Califórnia.

A principal contribuição de Stanton foi relacionar a expansão e o fissuramento de barras de argamassa à associação de cimentos com altos teores de álcalis e agregados, quando estocados em ambientes com elevada umidade relativa. Dessas observações resultaram duas conclusões que foram o fundamento para os métodos de inibição da reação álcali-agregado:

- As expansões foram mínimas quando o teor de álcalis presente no cimento, expresso em termos de equivalente alcalino ( $\text{Na}_2\text{O}_e$ ), situava-se abaixo de 0,6%;
- A substituição parcial de cimento por pozolana foi capaz de prevenir a ocorrência de expansões excessivas.

Contudo, de acordo com Paulon (apud DAEHR, 2007), o primeiro caso de reação álcali-agregado foi detectado por Roy Jay Holden, do Instituto Politécnico da Virgínia, em 1935, ao analisar petrograficamente amostras deterioradas de concreto.

Ainda, segundo Peterson et al (apud DAEHR, 2007), foram encontradas evidências de que a reação está presente em estruturas do final do século XIX.

Tendo como base o trabalho de Stanton, H. S. Meissner, do U.S. Bureau of Reclamation, desenvolveu, ainda na década de 40, novas pesquisas para tentar compreender o fissuramento anormal em barragens de concreto e seus achados corroboraram as conclusões iniciais de Stanton quanto à importância do teor de álcalis presente no cimento, composição do agregado e condições de exposição ambiental (ACI, 1998).

No mesmo período, outras agências, tanto nos Estados Unidos, quanto em outros países, Austrália por exemplo, dedicaram-se a entender a relação entre a composição do cimento, tipos de agregados, traços de argamassa e concreto e o fenômeno das expansões.

Outros pesquisadores, nas décadas de 40 e 50, como é o caso da Hansen da Portland Cement Association, e Powers dedicavam-se a averiguar o mecanismo pelo qual a reação ocorria (ACI, 1998).

No Brasil, o assunto é introduzido na década de 60, por Gitahy e Ruiz, pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Através de um convênio com as Centrais Elétricas de Urubupungá S.A. foram examinadas amostras de cascalhos visando à construção da Barragem de Jupiaá, no rio Paraná (PRISZKULNIK, 2005).

A composição mineral destes cascalhos foi comparada com uma lista de minerais deletérios proposta por Stanton, surgindo daí uma suspeita sobre a sua reatividade.

O material foi ensaiado pelos métodos ASTM C289-61T e C227-61T, os quais confirmaram o caráter reativo.

Decorreu daí a primeira utilização de pozolana para a prevenção da reação álcali-agregado em solo nacional. Este material foi produzido no próprio canteiro de obras da barragem de Jupuíá, sob a orientação dos estudos realizados no setor de Cerâmica do IPT.

Contudo, somente na década de 80 iniciam-se os estudos sobre a reação álcali-agregado no Brasil. Em 2000, Andriollo (apud VALDUGA, 2002) relata a ocorrência de, pelo menos, 19 barragens afetadas.

Valduga (2006), em levantamento realizado no estado de São Paulo, colheu 36 amostras de rochas em 26 locais diferentes. O estudo concluiu que cerca de 60% delas era reativo. Destas amostras, oito referiam-se a basaltos.

Quando, em 2005, foram identificados os primeiros casos de reação álcali-agregado em fundações de edifícios na região metropolitana do Recife, em Pernambuco, o Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (CB-18) lançou o desafio ao meio técnico nacional para a busca de soluções para o problema, tendo em vista a larga experiência nacional em construção de barragens. Desse trabalho resultou, em 2008, a publicação da NBR 15577, composta por 6 partes, oferecendo ao meio técnico nacional diretrizes para abordagem do fenômeno.

Battagin et al (2009) relaciona cerca de 61 casos brasileiros de patologias em estruturas de concreto, nas quais se comprovou a ocorrência da reação álcali-agregado. A metade dos casos se refere a barragens ou estruturas hidráulicas, como tomadas de água ou reservatórios e a outra metade a fundações de edifícios residenciais e bases de concreto para equipamentos.

Com a sensibilização do meio técnico para o problema, diversas linhas de pesquisa têm surgido no Brasil, desde o estabelecimento de medidas preventivas ou mitigatórias, busca de novos materiais pozolânicos naturais, industrializados ou subprodutos provenientes de diversos processos, estabelecimento de modelos que permitam prever as tensões geradas pela expansão, utilização de aditivos químicos até o estabelecimento de parâmetros confiáveis para testes que visam à

determinação do potencial reativo de agregados, o que ainda permanece um tema controverso.

#### 4.7.2 A reação Álcali-sílica: Modelos e Entendimento Atual

**A** reação álcali-sílica envolve a presença de sílica amorfa ou certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais que reagem quimicamente com os íons alcalinos e hidroxilas originados na hidratação do cimento (FURNAS, 1997).

Esta seção contém uma visão evolutiva quanto ao desvendamento do mecanismo da RAS. Ao seu final será apresentado o resumo do entendimento atual.

Após o reconhecimento da existência da reação álcali-sílica, já a partir da década de 40, diversos pesquisadores iniciaram estudos para entender o seu mecanismo.

O primeiro a propor um modelo foi Hansen, da Portland Cement Association, o qual ficou conhecido como o modelo das pressões osmóticas (ACI, 1998).

Paulon (1981) apresenta, na sua dissertação de mestrado em Engenharia Civil, um excelente resumo da hipótese de Hansen para explicar o mecanismo pelo qual a reação dos álcalis do cimento com a sílica do agregado produz expansões no concreto.

A hipótese baseia-se na reação de hidróxidos alcalinos com a opala, que produz silicatos alcalinos, os quais dão lugar a pressões osmóticas devido à natureza semipermeável da pasta de cimento hidratada.

O esquema químico principal do fenômeno pode ser descrito assim:




---

<sup>11</sup> Os coeficientes estequiométricos m1, m2, m3 e m4 indicam que o silicato álcali-cálcico formado nesta reação possui uma composição variável.

Onde:

- a) O sódio ( $\text{Na}^+$ ) designa o teor de álcalis expresso em  $\text{Na}_2\text{O}_e$ ;
- b) O hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é liberado durante a hidratação do cimento, pelos silicatos bicálcicos ( $\text{C}_2\text{S}$ ) e tricálcicos ( $\text{C}_3\text{S}$ ).



↓

silicato tricálcico

↓

C-S-H – gel

↓

portlandita



↓

silicato bicálcico

↓

C-S-H – gel

↓

portlandita

- c) O  $\text{SiO}_2$  representa a sílica reativa (dióxido de silício). Quando este reage com hidróxidos alcalinos dá origem a silicatos de sódio e potássio que requerem menos volume e são, tanto no estado vítreo quanto em soluções aquosas, estáveis. Por outro lado, os géis de sílica são estáveis e tendem, com o tempo, a sofrerem contração quando saturados com água.

Tendo em mente o exposto, não é de se esperar que ocorram expansões que possam ser atribuídas aos silicatos alcalinos puros formados. Assim, os processos expansivos, que têm lugar no concreto, não estão ligados a uma hidratação de silicatos ou géis.

Esta constatação reforça a teoria de Hansen de que as expansões são devidas a uma pressão osmótica que surge com a formação de uma membrana semipermeável a partir do gel de sílica.

Powers e Steinour, em 1955 (PRISZKULNIK; 2005), propuseram a hipótese de que, dependendo da concentração relativa de álcalis e hidróxido de cálcio ao redor do

grão de agregado reativo e dos fatores que controlam a velocidade de difusão dos íons e da água, o gel produzido pode ser expansivo ou não.

Plun; Poulsen; Idorn (1958 apud PAULON, 1981), conceberam um outro modelo para o mecanismo da reação álcali-sílica. As figuras 4.7 e 4.8 exemplificam o modelo.

Neste modelo a partícula de sílica reativa mostra-se envolta em pasta de cimento, na qual encontram-se presentes os íons  $\text{Ca}^{++}$ , provenientes do hidróxido de cálcio dissolvido, formado durante a hidratação do cimento e os álcalis  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , oriundos dos compostos alcalinos dissolvidos no cimento (a). Nesta situação, em que o meio é uma solução básica, ocorre a formação de uma substância coloidal insolúvel (gel) que, a depender da concentração de cálcio, pode ter ou não caráter expansivo.

Caso existam íons cálcio em abundância no sistema, ocorrerá a formação de um gel de cal e álcali-sílica de coloração branca e de natureza não expansiva. Se o íon cálcio ocorrer de maneira menos abundante, forma-se um gel de álcali-sílica expansivo. Esta expansão deve-se à adsorção de água que pressiona a região circunvizinha.

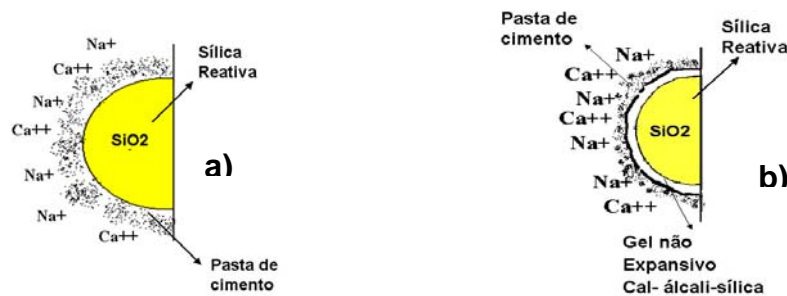
A ilustração (b) mostra a partícula reativa numa fase inofensiva, também chamada de inócua, na qual a partícula de sílica reativa mostra-se envolta por uma delgada camada de gel não expansivo de cal-álcali-sílica. Nesta etapa, a concentração de  $\text{Ca}^{++}$  é alta. Se, com a evolução da reação, o teor de álcalis no sistema se mantiver baixo, sempre haverá cálcio suficiente para formar o gel não expansivo.

A ilustração (c) caracteriza a fase chamada de deletéria, ou expansiva, da reação alcalina, sendo que a sílica reativa é "porosa" e o gel de álcali-sílica, sem cal, desenvolve-se em sua superfície interna.

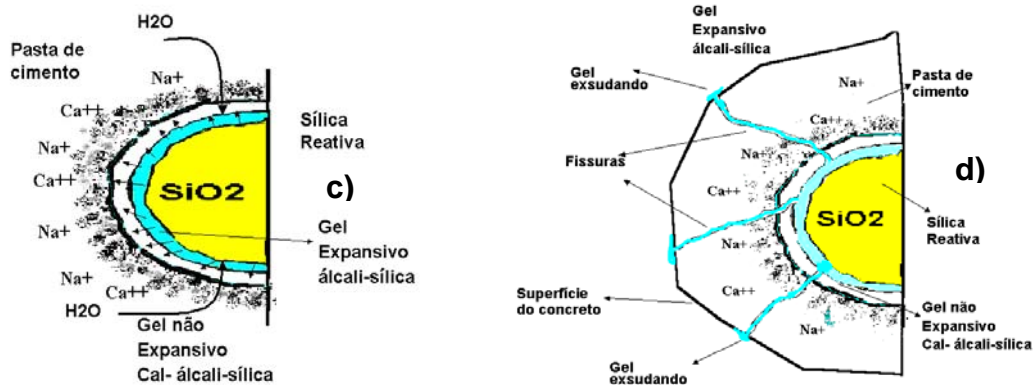
Este gel pode se expandir indefinidamente por adsorção de água. Nesta etapa, os íons de cálcio e de álcalis devem passar pela membrana semipermeável formada inicialmente, a fim de reagirem com a sílica.

O gel que compõe esta membrana semipermeável possui uma superfície interna bastante grande e, por conseguinte, uma capacidade apreciável de reter íons cálcio e álcalis.

**Figura 4.7** - Ilustração do modelo proposto do Plun; Pousen; Idorn desenhada a partir de Paulon (1981). a) Partícula reativa b) fase inofensiva.



**Figura 4.8** - Ilustração do modelo proposto do Plun; Pousen; Idorn desenhada a partir de Paulon (1981): c) Fase deletéria d) Exsudação de gel.



Se a concentração de álcalis for maior, a adsorção predominante será de álcalis; se for baixa, predominará a adsorção de cálcio. Deve-se considerar ainda, o fato de que os íons alcalinos se difundem mais rapidamente que os de cálcio, por apresentarem maior mobilidade.

Caso o consumo de álcalis, durante a reação, não seja tal que a concentração de cálcio se torne importante, haverá a formação contínua do gel expansivo de álcali-sílica abaixo do gel não expansivo de cal-álcali-sílica, anteriormente formado. Se houver uma certa quantidade de água, o gel de álcali-sílica inchará, criando forças que podem romper o sistema (ilustração d). O sistema rompe quando estas forças expansivas superam a resistência à tração da pasta de cimento. A partir deste ponto surgem grandes fissuras e, conseqüentemente, o extravasamento do gel. A reação

não cessa até que todo o álcali seja consumido ou toda a sílica tenha sido utilizada, ou seja, quando a reação chega ao centro da partícula.

O gel que exsuda deposita-se sobre a superfície do concreto e endurece em contato com o ar.

Em artigos publicados em 1975 e 1976, Diamond (PRISZKULNIK, 2005) formulou a proposição de que a reação é, principalmente, devida ao ataque dos íons hidroxilas ao grão reativo e não uma decorrência imediata da presença de álcalis na solução dos poros, muito embora, a concentração de hidroxilas, esteja estreitamente correlacionada à presença dos cátions alcalinos.

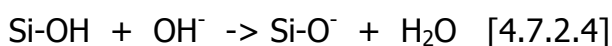
Em 1990 foi publicado na França um relatório atualizando o conhecimento sobre as reações álcali-agregado (PRISZKULNIK, 2005). Segundo este documento, o mecanismo da reação se desenvolve em diversas etapas, que vão do ataque ao agregado, à expansão do gel, à evolução da fase líquida intersticial e às difusões de íons.

No ataque ao grão de agregado reativo estão compreendidas duas etapas:

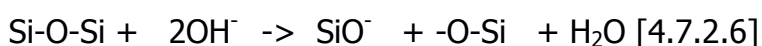
- a) Migração dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$  da fase líquida para a partícula reativa (processo físico);
- b) Reações com o agregado e formação do gel de silicato alcalino (processo químico).

Em particular, este processo químico, ocorre em duas etapas consecutivas:

b.1) Reação do tipo ácido-base, entre grupos silanóis e hidroxilas, resultando na formação de gel:



b.2) Ataque às pontes de siloxanos, com a formação de um silicato alcalino ( $\text{Si-O-Na}^+$ ) ou de grupos  $\text{H}_2\text{SiO}_4$ . Ambos levam à destruição da estrutura da sílica:



Esta segunda etapa é controlada por alguns fatores, principalmente ligados ao agregado:

- Quanto mais permeável for a interface pasta-agregado, maior a difusão de íons;
- A porosidade do agregado determina a profundidade do ataque. Se o agregado for poroso ocorrerá a formação de gel inclusive no seu interior. Caso contrário, o gel permanece apenas na sua superfície;
- A intensidade da reação depende do volume da partícula e, por extensão, da sua superfície específica. Abaixo de um certo volume, as partículas podem reagir totalmente antes que os álcalis disponíveis tenham sido consumidos.

São três as etapas do processo de expansão do gel: hidratação, expansão e dissipação. A expansão é tida como resultante da adsorção física de fluido ao gel, gerando uma expansão localizada. Por sua vez, a dissipação do gel é função da viscosidade do silicato, em especial da relação álcali/sílica.

Prezzi et al (1997) em um trabalho que ressalta a importância da química de superfície na reação álcali-agregado, mostram que há vários aspectos da reação que não são bem compreendidos. Particularmente, não se entende como a composição química do gel se modifica durante a reação e como esta composição afeta a capacidade do gel em expandir. O papel principal dos hidróxidos de sódio e potássio é aumentar o pH, de modo que a ligação Si-O-Si seja atacada pelos íons OH<sup>-</sup>. Não é claro até que ponto os íons alcalinos são incorporados à estrutura do gel, uma vez que muitos resultados diferentes de análises da composição do gel têm sido relatados. Especula-se que géis com grande teor de álcalis são fluidos e podem se mover através da pasta sem causar grandes danos. Isto é confirmado pela presença de grandes quantidades de álcalis nos géis que foram colhidos na superfície do concreto. Há controvérsias no que se refere aos efeitos do cálcio no comportamento do gel. Powers; Steinour (apud PREZZI, 1997) propuseram que a concentração de cálcio no gel determina a sua subsequente expansão.

Os valores relatados na literatura para a concentração de cálcio em géis resultantes da reação álcali-agregado se encontram dentro de uma larga faixa (IDORN;

KNUDSEN; THAULOW apud PREZZI, 1997). Não é sempre claro se o cálcio analisado é um componente do gel ou se ele aparece como hidróxido de cálcio ou carbonato de cálcio disperso no gel. A incorporação de cálcio no gel é, muitas vezes, considerada como uma reação secundária, ocorrendo após a formação inicial do gel, e tem sido sugerido que géis contendo cálcio não são expansivos (STRUBLE apud PREZZI, 1997).

Knudsen e Thaulow (apud PREZZI, 1997), analisaram o gel ao longo de uma fissura na pasta de um concreto com reação álcali-agregado e relataram que a concentração de cálcio no gel é maior, quanto mais afastado o gel se encontra do agregado reativo. Isto sugere que o gel obtém cálcio à medida que percorre a fissura. Entretanto, os mesmos autores, nota Prezzi (1997), bem como outros pesquisadores, relatam altas taxas de cálcio nos géis próximo ao agregado.

Dent Glasser e Kataoka (apud PREZZI, 1997) e Furnas (1997), contribuíram em muito para o entendimento da química da reação álcali-agregado. Investigando um gel de sílica de reação rápida colocado em soluções de hidróxido de sódio de diferentes concentrações, perceberam que, com a mistura, à medida que a sílica se dissolvia, a concentração de íons de sódio aumentava novamente.

A partir desta constatação, inferiu-se que íons sódio participam da reação álcali-agregado no concreto. Numa segunda investigação, o gel de sílica foi introduzido em uma solução, de hidróxido de cálcio. A inspeção utilizando microscópio de transmissão eletrônica revelou que o gel de sílica reagiu com os íons cálcio em solução produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Com base neste conhecimento, Dent Glasse e Kataoka (apud PREZZI, 1997) identificaram quatro reações pertencentes ao sistema sílica gel / hidróxido de sódio / hidróxido de cálcio. Elas foram identificadas como sendo:

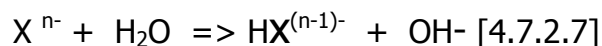
- a) dissolução da sílica no agregado pelo ataque de hidroxilas;
- b) reação dos grupos silanol (Si-OH) com os íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) em solução para promover ainda mais dissolução;
- c) ligação dos cátions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  a posições carregadas negativamente na superfície dos silicatos;

- d) reação das espécies de sílica em solução com íons de cálcio em solução para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Confirma-se, dessa forma, que três componentes são essenciais para que ocorram danos em função da reação álcali agregado (PREZZI, 1997):

- a) a disponibilidade de álcalis;
- b) a presença de sílica reativa;
- c) água para possibilitar a expansão do gel.

Prezzi (1997) reitera que, com a mistura do cimento e água, álcalis são liberados a taxas variáveis para a solução dos poros. A recombinação dos íons silicatos, aluminatos e sulfatos restantes governa a reação álcali-agregado por aumentar o pH da solução nos poros. A hidrólise dos ânions de ácidos fracos, como é o caso dos silicatos, pode ser mostrada através da seguinte equação:



O hidróxido de cálcio solúvel reage com os ânions sulfat,o formando sais de cálcio solúveis, como segue:



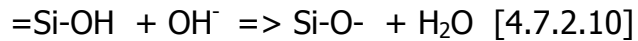
Ambas as reações geram íons hidroxila, aumentando o pH da solução nos poros. Em uma solução saturada de hidróxido de cálcio, o pH máximo tipicamente é de 12,4. Contudo, um pH levemente mais alcalino de 12,5 a 13,5 é característico das soluções nos poros do concreto, o que evidencia o efeito dos álcalis. A sílica aumenta marcadamente a sua dissolução com o aumento do pH.

Segundo Dent Glasser e Kataoka (apud PREZZI, 1997), o ataque álcali-sílica em concreto é iniciado pela dissolução da sílica presente no agregado. Dois mecanismos foram identificados para a dissolução da sílica no concreto:

a)Primeiro mecanismo: ataque por hidroxilas e reação das hidroxilas com grupos silanol. O ataque por hidroxilas ou hidrolisação, que resulta na formação dos grupos silanol, segundo alguns autores, ocorre segundo o esquema:



b) Segundo mecanismo: reação dos grupos silanol existentes ou grupos silanol produzidos pelo ataque por hidroxilas, com íons hidroxilas abundantes na solução dos poros do concreto.

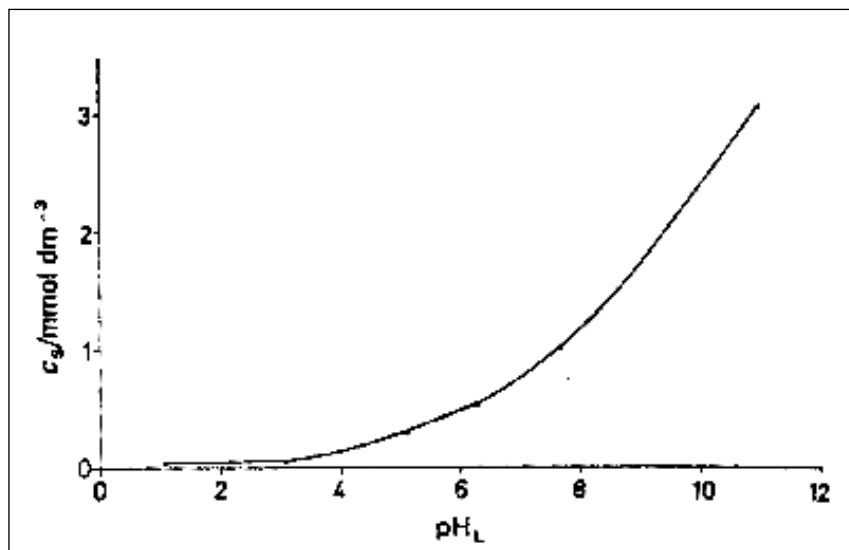


Esta explicação é apoiada por Iler (apud PREZZI, 1997), que considera as hidroxilas catalisadores da dissolução da sílica. Em soluções alcalinas, como a dos poros de concreto, as hidroxilas são capazes de penetrar na estrutura aberta de silicatos amorfos, se acomodando entre íons de oxigênio. Quando se adsorvem quimicamente à superfície, as hidroxilas aumentam o número de coordenação do átomo de silício para mais do que quatro, enfraquecendo efetivamente as ligações Si-O<sup>-</sup>. Essas reações, como apresentadas, são de um modo geral aceitas por especialistas em concreto.

Demonstra-se que o grau de alcalinidade da solução tem um efeito marcante na solubilidade da sílica.

Vogelsberger et al (apud PREZZI, 1997), registraram a concentração de saturação da sílica, com relação ao pH da solução, para gel de sílica em uma solução com pH variando de 1 a 11, mantida a temperatura ambiente. A solubilidade aumentou continuamente a partir de um pH igual a 5, onde a concentração medida foi de aproximadamente 0,3 mmol dm<sup>-3</sup>, até um pH de 11 onde a concentração medida foi de 3,1 mmol dm<sup>-3</sup>. O gráfico 4.6 ilustra a afirmação.

**Gráfico 4.6** - Variação da solubilidade da sílica em função do pH da solução (Fonte: VOGELSBERGER et al apud PREZZI, 1997)



Ainda, segundo Prezzi (1997), como a dissolução da sílica no agregado de origem é o passo inicial na reação álcali-agregado, a concentração de sílica dissolvida, disponível para participar de tal reação, é de importância significativa. Resultados também mostram que a solubilidade da sílica aumenta à medida que aumenta a temperatura de 25°C para 45°C e 55°C. Estruturas de grande porte, como barragens, sofrem tais aumentos significativos de temperatura, principalmente nas primeiras idades, à medida que se desenvolvem as reações de hidratação do cimento. Portanto, o aumento de duas vezes na solubilidade, observado para um pH de 10 e as temperaturas investigadas, podem ter influência na ocorrência de reação álcali-agregado em tais estruturas de grande porte.

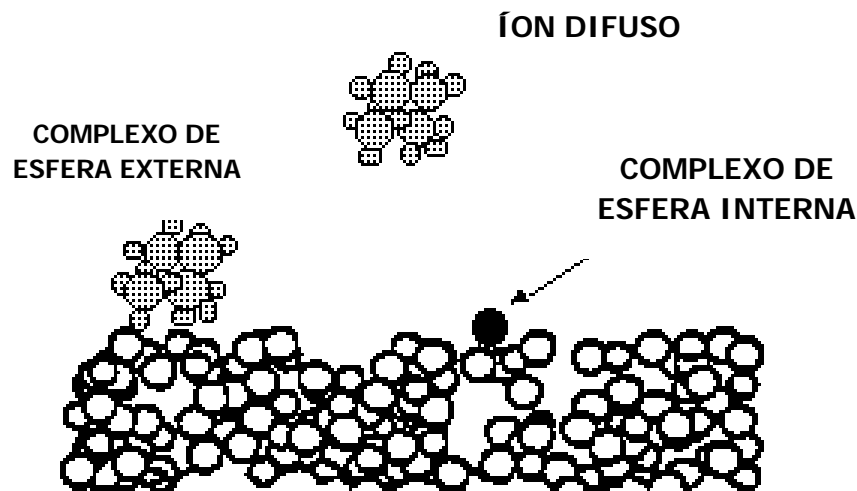
Os géis de sílica são formados por partículas extremamente pequenas que se comportam como um sistema coloidal. Segundo Prezzi (1997), a importância da química de superfícies e colóides já há muito tempo foi reconhecida por outras áreas da engenharia, como a da geotecnia e a ciência dos solos. Contudo, com poucas exceções, a importância da química de superfícies e colóides ainda não foi bem reconhecida na área de deterioração de concreto. Baseando-se em resultados de ensaios disponíveis, se afirma que a química de colóides pode explicar o comportamento do produto da reação álcali-agregado no concreto. Em casos onde a sílica amorfa está presente, a reação álcali-agregado é muito mais rápida do que em

casos onde somente formas cristalinas de sílica ocorrem, considerando que todos os outros fatores sejam os mesmos.

De acordo com Tan (apud PREZZI, 1997), um colóide consiste de partículas muito pequenas que se aproximam, mas nunca atingem tamanho molecular (o limite máximo para o tamanho dos colóides é de 0,2  $\mu\text{m}$  e o limite mínimo é de aproximadamente 50  $\text{\AA}$  ou 5nm).

Em geral, conforme assinalado no trabalho de Prezzi (1997), uma superfície sólida pode desenvolver carga elétrica por substituição isomórfica de íons na estrutura do sólido, reações na superfície e adsorção de íons. Um íon pode ser adsorvido a uma superfície, formando um complexo de esfera interna, quando nenhuma molécula de água se encontra entre o grupo funcional de superfície e o íon, ou um complexo de esfera externa, quando, pelo menos, uma molécula de água existe entre a superfície e o íon. A figura 4.9 mostra que íons podem também ser adsorvidos na nuvem difusa da dupla camada com o objetivo de neutralizar a carga da superfície. Íons alcalinos são inicialmente adsorvidos, principalmente por forças eletrostáticas em posições onde o oxigênio tem ligações incompletas na superfície de um vidro, de modo que a troca iônica é similar ao comportamento ácido-base da posição com ligações incompletas.

**Figura 4.9** – Formas de adsorção de íons, segundo Prezzi (1997)



Simulações dinâmicas moleculares (GAROFALINI; ZIRL apud PREZZI, 1997) indicam que o potássio é adsorvido em posições onde o oxigênio tem ligações incompletas, e quando estas ligações se tornam saturadas, o potássio pode então ser adsorvido ao oxigênio que está associado a ligações deformadas do siloxano com ligações completas.

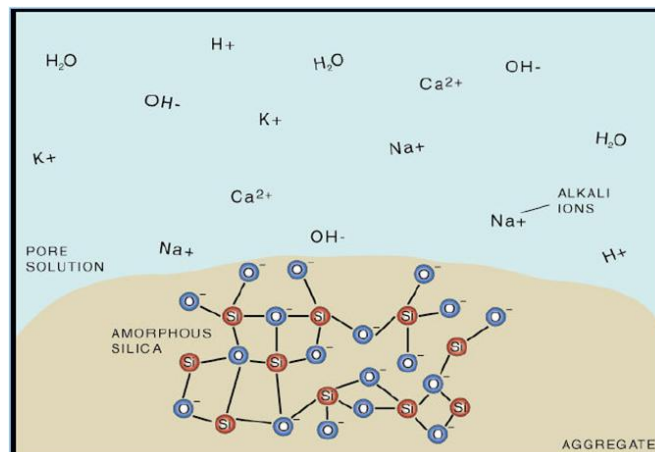
Cada partícula de sílica interage com os fluidos dos poros, cria o seu próprio campo de força (o campo de força é significativo quando comparado ao peso da partícula), e atrai contraíons para neutralizar a sua carga eletronegativa.

Os contraíons estão sob a influência dos movimentos brownianos irregulares, que tendem a dispersá-los para longe da interface, e de forças de Coulomb que os atraem à superfície da partícula. Estas forças determinam a distribuição de contraíons, em função da distância da partícula. O comportamento do sistema será determinado pelas interações simultâneas de todos os campos de força das partículas (PREZZI, 1997). O entendimento atual sobre o desenvolvimento das reações álcali-sílica pode ser resumido pelo esquema apresentado por Collins, C. L. et al (2002):

➤ **Fase 1:**

O grão de agregado, com fase reativa devido à sílica amorfa ou pobremente cristalizada, entra em contato com a solução dos poros do concreto.

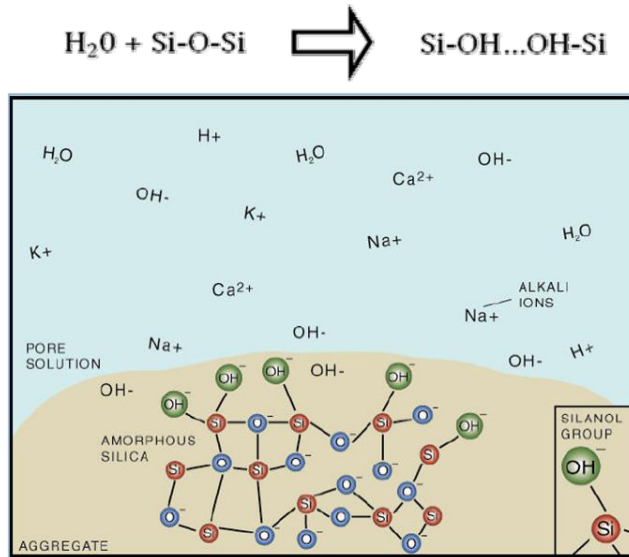
**Figura 4.10** – Agregado reativo em contato com a solução alcalina dos poros de concreto. (Collins, C. L. et al, 2002)



➤ Fase 2

A superfície do agregado é atacada pelos íons  $\text{OH}^-$ , que rompem a ligação Si-O-Si para formar grupos Silanol.

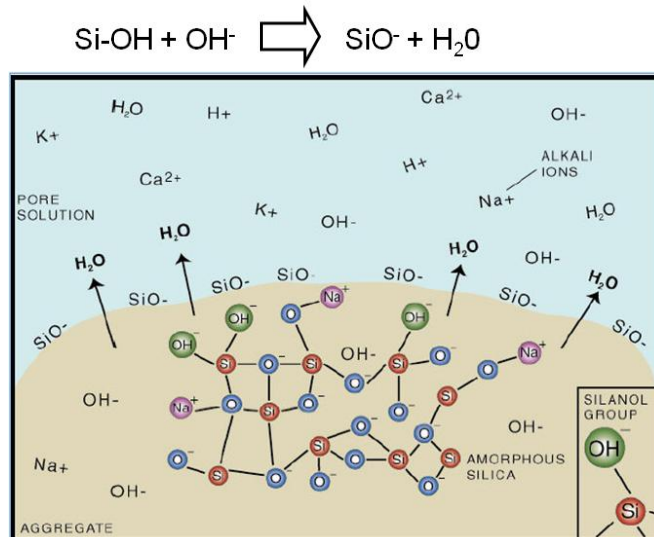
**Figura 4.11** – A superfície do agregado reativo sendo atacado pelos íons  $\text{OH}^-$  formando grupos silanóis. (Collins, C. L. et al, 2002)



➤ Fase 3

Os grupos silanóis ( $\text{Si-OH}$ ) são rompidos pelos íons  $\text{OH}^-$  formando íons  $\text{SiO}^-$  sobre a superfície do agregado.

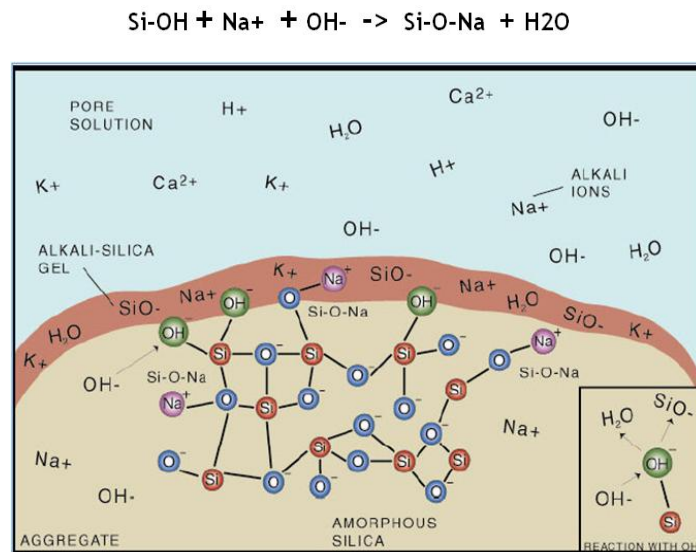
**Figura 4.12** – Os grupos silanóis são rompidos pelas hidroxilas formando íons  $\text{SiO}^-$  na superfície do agregado. (Collins, C. L. et al, 2002)



➤ **Fase 4**

Os íons  $\text{SiO}^-$  atraem os cátions alcalinos da solução dos poros, formando gel de silicato alcalino em torno do agregado.

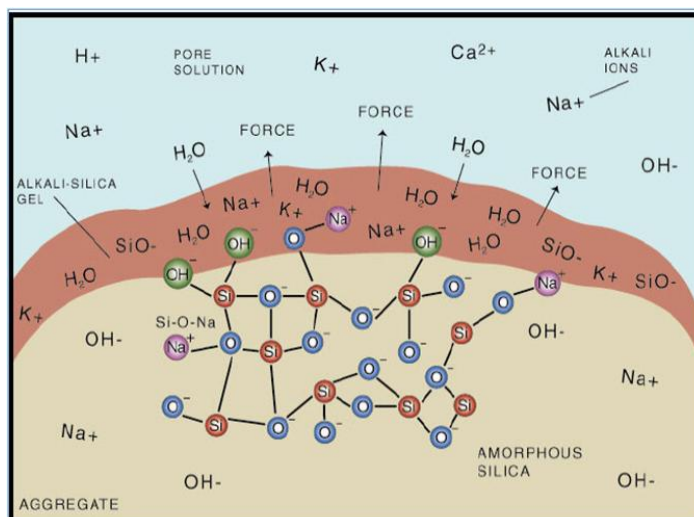
**Figura 4.13-** Formação de gel alcalino na superfície do agregado (Collins, C. L. et al, 2002).



➤ **Fase 5**

O gel alcalino em contato com a água, expande, exercendo pressão osmótica sobre a pasta de cimento ou agregado.

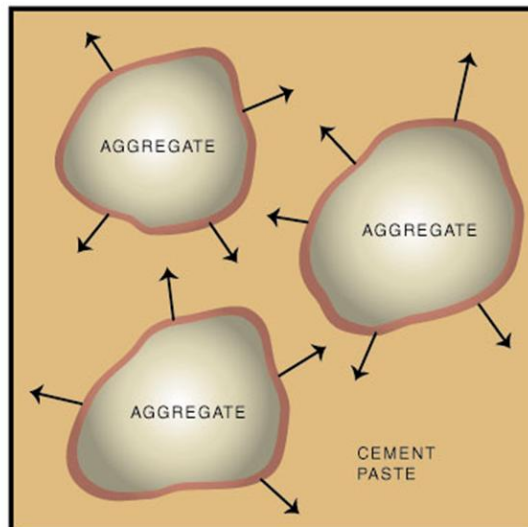
**Figura 4.14 –** Expansão do gel alcalino formado na superfície do agregado. (Collins, C. L. et al, 2002)



### ➤ Fase 6

Quando a pressão gerada pela expansão do gel ultrapassa a tensão de tração do concreto, este fissura.

**Figura 4.15** – Fissuramento do concreto após ser atingida a sua tensão máxima de tração (Collins, C. L. et al, 2002)



## 4.8 A MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

**M**itigar a reação álcali-sílica, de acordo com a NBR 15.577-1:2008, significa abrandar, reduzir ou atenuar os seus efeitos.

As primeiras recomendações para mitigar a reação álcali-agregado, após a descoberta de Stanton em 1940, consistiam simplesmente em evitar a utilização de agregados reativos e de cimentos com altos teores de álcalis.

Posteriormente, passou-se a recomendar a incorporação de materiais pozolânicos ao concreto, tais como cinzas volantes, sílica ativa e escória de alto forno, por ter-se percebido que cimentos contendo adições pozolânicas eram eficientes em reduzir a expansão atribuída à reação álcali-sílica. (CARLES-GIBENGUES, A. et al., 2008).

O combate à reação álcali-agregado com o uso de adições pozolânicas já é bem conhecido. Segundo Diamond (1984 apud TIECHER, 2006) a sílica presente nas

adições reage com os álcalis do cimento antes que a sílica existente nos agregados seja atacada, não gerando produtos expansivos.

A incorporação de adições pozolânicas diretamente ao concreto, segundo Tiecher (2006), ainda não é uma prática comum no meio técnico, salvo no caso de grandes obras, como barragens ou pontes.

A utilização de materiais cimentícios suplementares, SCM, também conhecidos como adições ativas (MUNHOZ, 2007) tais como a sílica ativa, metacaulin, cinzas-volantes com alto teor de cálcio e escória de alto forno são reconhecidamente inibidores da reação álcali-agregado (CYR, M., 2009). A literatura aponta, em geral, quatro mecanismos de inibição da RAS associados ao uso destas adições:

- Aumento da impermeabilidade do concreto;
- Diluição dos álcalis (redução do teor de cimento no concreto);
- Redução do pH da solução dos poros (conseqüência da reação pozolânica);
- Mudança na composição do C-S-H, aumentando sua capacidade de retenção de álcalis.

O aumento da impermeabilidade do concreto ocorre por conta da redução do diâmetro dos poros da pasta, o que leva a uma natural diminuição no ingresso de umidade e conseqüente inibição da entrada de álcalis.

A diluição do teor de álcalis, em relação ao teor de ligante total, é decorrência da substituição de parte do clínquer por adições pozolânicas. Como o clínquer é, via-de-regra, a principal fonte de álcalis do cimento, a diminuição do seu teor leva a uma redução do teor de álcalis disponíveis na solução dos poros.

A reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio liberado pelas reações de hidratação do cimento e os componentes reativos das adições provoca a redução do pH da solução presente nos poros, o que se constitui num fator desfavorável à ocorrência da reação álcali-sílica.

A alteração da relação molar Ca/Si no C-S-H, resultante da hidratação do cimento, tem o potencial para influenciar o desenvolvimento das reações álcali-sílica. Se o C-S-H formado apresentar uma baixa relação molar Ca/Si, haverá maior retenção de

álcalis em sua estrutura e, conseqüentemente, um efeito benéfico em prevenir a ocorrência da RAS. O contrário também é verdadeiro: C-S-H de elevada relação molar Ca/Si implica em baixa retenção de álcalis.

Munhoz (2007), estudando a mitigação da reação álcali-sílica do conjunto agregado basáltico-cimento de alta resistência inicial, relata a diferença de eficiência de 4 tipos diferentes de SCM. A tabela 4.4 apresenta um resumo dos teores mínimos, utilizados em substituição ao cimento, necessários para reduzir a expansão aos níveis preconizados pela ASTM C 1567.

A diferença na capacidade de mitigar a reação álcali-sílica resulta, segundo Munhoz (2007), de diferenças na composição química e mineralógica e diâmetro das partículas. O conjunto destas propriedades tem influência sobre a reatividade pozolânica da adição, sua capacidade de reduzir o teor de hidróxido de cálcio, e com isso minimizar a reação álcali-sílica. No caso da escória, há um outro fator a ser considerado, relacionado a sua composição química: o teor de cálcio presente na escória é maior que nas demais adições e, portanto, torna-se mais difícil minimizar a relação CaO/SiO<sub>2</sub>.

**Tabela 4.4** – Teores mínimos de SCM necessários para a mitigação da reação álcali-sílica gerada da combinação de agregados basálticos e cimento de alta resistência inicial (MUNHOZ, 2007)

SCM (ADIÇÃO ATIVA)	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (m <sup>2</sup> /kg)	TEOR DE SiO <sub>2</sub> (%)	TEOR DE CaO (%)	TEOR DE Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TEOR DE Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TEOR MÍNIMO (% peso cimento)
Escória A. Forno	416	35,0	44,7	11,1	1,9	45%
Cinzas Volantes	468	66,4	2,6	18,7	5,9	20%
Metacaulin	2343	49,9	0,7	41,4	3,8	13%
Sílica Ativa	1900*	91,6	0,9	0,1	0,3	9%

Obs: \* Fonte : Tecnosil ([www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/](http://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/)), valor aproximado.

Uma outra possibilidade, em estudo desde 1951 (MCCOY; CALDWELL apud KURTIS, K. E. e MONTEIRO, P. J. M. , 2003), é a utilização de sais de lítio ou cálcio e de alguns compostos orgânicos como a acetona.

Contudo, uma vez que não há um entendimento preciso quanto ao mecanismo de ação de tais compostos em inibir a expansão, torna-se difícil sua utilização efetiva. Dessa forma, não é fácil prever a eficácia do aditivo e a duração do seu controle para poder especificar a dosagem e criar um sistema prático para sua utilização.

A literatura consultada sugere pelo menos cinco formas de atuação dos sais de lítio e cálcio para inibir a expansão:

- a) Promover a dissolução da sílica e inibir a sua repolimerização;
- b) Suprimir a dissolução, diminuindo a formação de gel expansivo;
- c) Interagir com a sílica formando um produto não expansivo ou menos expansivo;
- d) Reduzir a expansividade do gel;
- e) Retardar a formação do gel através da formação de precipitados ou membranas semi-permeáveis.

Os achados de Kurtis, K. E. e Monteiro, P. J. M. (2003) parecem corroborar as hipóteses das letras a) e letra e).

Os sais de lítio, como  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{LiF}$ ,  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{LiNO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{SO}_4$ , tem-se mostrado promissores tanto em laboratório, quanto em campo (MO, X. et al.;2005).

Shneider et al (2008), estudando o efeito do  $\text{LiNO}_3$  sobre uma amostra de gel expansivo, coletado em uma galeria de uma das barragens do sistema Furnas, verificaram a ocorrência de uma mudança na estrutura do gel. Antes do tratamento, ou seja, quando coletado, o gel apresentava uma estrutura composta por camadas. Após o tratamento, a estrutura migrou para o formato de uma rede desordenada. Esta mudança, sugerem os autores, pode ter um papel importante na redução da expansividade do gel.

MO, X. et al (2003) sugerem como fator chave para que o lítio seja capaz de inibir a expansão devida à RAS é que o íon  $\text{Li}^+$  possui um pequeno raio e uma elevada densidade de carga em sua superfície, se comparado ao  $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$ , o que faz com que ele penetre no gel mais rapidamente. O gel resultante é cristalino e não expansivo.

#### 4.9 USO DO PÓ DE AGREGADOS REATIVOS NA MITIGAÇÃO DA RAS

**R**ecentemente, segundo relatos encontrados na literatura disponível (Quadro 4.2), uma nova forma de mitigação está sendo estudada. Trata-se da utilização de pó de agregados reativos, RAP, como adição pozolânica em substituição parcial ao cimento ou à fração fina dos agregados miúdos. Estes agregados, tanto podem ser de origem natural, quanto derivados de resíduos, como é o caso de pó de vidro.

Como pode ser inferido da análise da literatura, a utilização de pó reativo de agregado natural, RAP, como potencial inibidor da reação álcali-sílica, ainda está limitada a alguns agregados (CYR M et al, 2009), o que faz com que os estudos nesta área sejam alvos potenciais de abordagem em pesquisas científicas.

O Quadro 4.2 traz uma relação de trabalhos utilizando pós de agregados naturais reativos estudados e relatados:

Carles-Gibergues et al (2008) sugerem que, quanto mais reativo é o agregado, enquanto gráudo, mais eficiente em combater a reação álcali-sílica é o pó dele derivado. Isto indica que a atividade do agregado, seja ela benéfica ou deletéria, seria função de sua capacidade de liberar sílica.

Pensando dessa forma, pode-se admitir que os RAP atuam mitigando a expansão através do mesmo mecanismo de uma pozolana tradicional. Ou seja, quando o pó reativo é disperso em uma pasta cimentícia, ocorre a liberação de sílica, resultando em uma redução da relação Ca/Si no C-S-H formado, o que potencializa a sua capacidade de reter álcalis em sua estrutura. A redução de álcalis livres na solução do poro reduz o pH e, conseqüentemente, o ataque aos agregados reativos.

**Quadro 4.2 – Relação de estudos com pó de agregados reativos.**

TIPO MINERALÓGICO	TEOR DE SUBSTITUIÇÃO	ÁREA ESPECÍFICA	REFERÊNCIA
Andesita	30% a 70% do cimento	300 a 1100 m <sup>2</sup> /Kg	Quinghan apud Carles-Gibergues et al (2008)
Calcário Silicoso	-	-	Guedom-Dubied et al apud Carles-Gibergues et al (2008)
Metaquartzito	10% a 20% da fração 0,08-4,00 mm da areia	100, 200 e 400 m <sup>2</sup> /kg	Carles-Gibergues et al (2008)
Calcário silicoso	10% a 20% da fração 0,08 - 4 mm da areia	200, 400 e 600 m <sup>2</sup> /kg	Carles-Gibergues et al (2008)
Agregado Opalino (Opala CT)	10% a 20% da fração 0.08-4,00 mm da areia	200, 400 e 650 m <sup>2</sup> /kg	Carles-Gibergues et al (2008)
Perlita	4%, 8%, 12%, 16%, 24% e 32% do teor de cimento em massa	330 m <sup>2</sup> /kg	Bektas, F. et al (2005)
Opala, Andesita, Metariolito, Quartzito, "Schist", Calcário silicoso e Grauvaca.	10% a 20% da fração passante # 80 µm	290 a 1040 m <sup>2</sup> /kg	Cyr, M. et al (2009)

O trabalho de CYR, M. et al (2009), estudando a utilização de RAP em substituição parcial do teor de agregado miúdo, mantendo a massa de cimento constante, apresenta algumas considerações quanto aos fatores, por ele identificados, que afetam a eficiência do RAP:

- **Teor de sílica:** As maiores reduções da expansão foram obtidas com RAP que apresentam maior teor de sílica e, como exemplo, cita-se o quartzito (94,1% de SiO<sub>2</sub>). Por outro lado, os RAP menos eficientes foram obtidos a partir de duas variedades de calcários silicosos que possuem baixo teor de sílica (20% de SiO<sub>2</sub>). Uma conclusão, que parece lógica, mas não ficou claramente demonstrada, é que quanto mais reativo o agregado, mais eficiente o pó obtido dele. Uma das razões que podem ter dificultado a confirmação é que, quanto mais reativo o agregado, maior o teor necessário de pozolana para mitigar a reação. Como foram utilizados teores de RAP fixos (10% e 20%), não foi possível observar precisamente esta relação.
- **Teor de RAP:** O efeito benéfico do RAP é observado quando se faz a utilização de uma quantidade adequada de pó. Teores insuficientes têm um efeito variável,

ora aumentando a expansão, ora inibindo. Este mesmo efeito é observado para pozolanas convencionais, como as cinzas volantes, de acordo com os estudos de Porter L.C. (1964 apud CYR, M. et al, 2009), entre outros.

Massazza, F. (1998 apud CYR, M. et al, 2009), sugere que este fato tem relação com a lentidão da reação pozolânica, quando comparada com a rápida liberação de álcalis e conseqüente aumento do pH na solução dos poros do concreto. Dessa forma, é provável que maiores teores de RAP sejam necessários quando o agregado for mais ativo ou quando o pó for menos eficiente por apresentar menor teor de sílica ou elevado teor de álcalis.

- **Superfície específica do RAP:** Foi observado que, quanto maior a superfície específica, maior a redução na expansão. Da mesma forma, um RAP utilizado com uma superfície específica inadequada, pode não reduzir suficientemente a expansão ou até mesmo aumentá-la. Maas, A. J. et al (2007), num estudo com quatro tipos de sílica ativa densificadas, perceberam um efeito semelhante quando a dimensão das partículas era superior a 150  $\mu\text{m}$ .

Dessa forma, um material que contenha sílica amorfa, dependendo da dimensão de suas partículas, pode ser considerado uma pozolana que inibe a reação álcali-sílica ou um agregado reativo.

Uma justificativa para este comportamento é que a reação pozolânica possui algumas analogias com a reação álcali-sílica, uma vez que, em ambos os casos, os grupamentos Si-O-Si são atacados pelos íons  $\text{OH}^-$  para dar origem a  $\text{SiO}^-$ . Deve-se reconhecer que há uma diferença no equilíbrio de cátions e também na cinética de ambas as reações.

- **Efeitos “imprevistos” do RAP:** Tem sido relatado por alguns pesquisadores (GUÉDON-DUBIED et al, 2000 apud CYR, M. et al , 2009); Shayan et al (1993); CYR, M. et al (2009) que, tanto SCM convencional ou o RAP, quando suas partículas não são finas o suficiente ou quando são empregados elevados teores, mesmo associados a agregados não reativos, podem ocorrer reações expansivas pelo uso dos finos em si.

Além do pó que pode ser obtido pela moagem de agregados naturais, há também estudos avaliando o pó obtido a partir de resíduos de materiais industrializados, como é o caso do vidro (SHI, C. et al, 2005; SHAYAN, A. e Xu, A, 2004 ; SCHWARZ, N. et al, 2008; DHIR, R., K. et al, 2009).

A característica favorável ao emprego de pó de vidro é o elevado teor de sílica, acima de 70%. Porém, como deficiência, pode-se apontar o elevado teor de álcalis que fica na faixa de 13% a 14%.

Os resultados em relação a sua atividade pozolânica e à capacidade de inibir a reação álcali-sílica ainda são conflitantes e parecem depender diretamente do tipo de vidro utilizado, sua coloração, finura e teor utilizado.

Shayan e Xu (2004), por exemplo, discutindo os resultados de suas pesquisas com vidro apontam a economia gerada pela substituição de pozolanas tradicionais, como a sílica ativa e as cinzas volantes, por pó reativo de vidro no combate à reação álcali-sílica.

#### 4.10 O USO DE FINOS DE BRITAGEM DE BASALTO E A MITIGAÇÃO DA RAS

**D**iversos trabalhos exploram características dos basaltos ou dos finos de britagem em relação à reação álcali-sílica (ALMEIDA apud CASTRO et al, 1997; ANDRIOLO (2005); CASTRO et al (1997); SALLES, OLIVEIRA e ANDRIOLO (1997)) compondo um panorama que demonstra o potencial de utilização deste material.

Como ficará evidenciado, a grande maioria dos trabalhos realizados ocupa-se com estudos visando o aproveitamento de finos para a produção de concreto, seja ele convencional, compactado com rolo ou de alto desempenho.

Encontrou-se na bibliografia consultada um único estudo propondo o aproveitamento de finos de basalto na composição de cimento Portland (GALAL, A. F. et al, 2004). O autor conclui que o cimento, com adição de 30% de basalto, apresenta uma resistência adequada. Os teores de CaO livre são proporcionais aos teores de basalto, embora a resistência decresça na proporção inversa.

A única exceção até o momento, a sugerir este tipo de aproveitamento entre os pesquisadores brasileiros é Montanheiro (1999), em sua tese de doutoramento, intitulada "Prospecção e caracterização de pozolanas na Bacia do Paraná, Estado de São Paulo".

Montanheiro (1999), ao tratar das rochas basálticas da Formação Serra Geral, ressalta que, por suas características mineralógicas e texturais, estas poderiam vir a ser pozolanas naturais. O destaque é dado às rochas basálticas de textura fina (matriz afanítica), estrutura vesículo-amigdaloidal – com ou sem presença de zeólitas – e coloração variando de avermelhada a acinzentada. Estas rochas são conhecidas popularmente pela terminologia "basalto olho de sapo" ou "pedra sapo".

Montanheiro (1999) relata que, embora o vidro vulcânico presente nos basaltos, principal responsável pela sua pozolanicidade, seja facilmente passível de sofrer alteração hidrotermal ou intempérica, e as amostras coletadas encontrarem-se freqüentemente neste estágio, foi possível identificar exemplares de potencial pozolânico.

Uma das amostras pesquisadas (TM-290) apresentou índice de atividade pozolânica com a cal igual a 6,4 MPa, que a qualifica, por si só, como pozolana natural. Outras amostras, embora alteradas, apresentaram índices situados entre 3 MPa a 5 MPa, que as qualificam como potencialmente pozolânicas.

Algumas das amostragens feitas por Montanheiro (1999) foram realizadas em pedreiras e, numa delas, que possuía uma camada de 15 metros de basalto amigdaloidal coletou-se um material que, após um período de cinco horas de ativação térmica a 800 °C, teve o seu índice de atividade pozolânica elevado de 4,3 MPa para 6,2 MPa.

Munhoz (2007), estudando uma amostra de basalto, elevou mecanicamente a superfície específica desta a cerca de 672 m<sup>2</sup>/Kg e obteve um índice de atividade pozolânica com a cal de 4,1 MPa.

O uso de agregado pulverizado como material cimentício foi sugerido pelo engenheiro russo Alberto D. Osipov, durante o desenvolvimento do traço para

aplicação de concreto compactado com rolo (CCR) a ser utilizado na construção da barragem de Capanda, em Angola (ALMEIDA apud CASTRO et al, 1997).

Osipov recomendou a sua utilização como agente inibidor da reação álcali-agregado, prescrevendo que a areia artificial deveria ter, pelo menos, 7% de material passante na peneira nº 200 e 10% passando na peneira nº 100.

A base teórica para esta utilização foi a suposição de que os finos de britagem, em função da energia eletrostática liberada pela quebra das moléculas durante o seu processamento, tornam-se ligantes. Essa característica tenderia a se estabilizar em consequência da reaproximação das moléculas devido à compactação.

No caso do arenito utilizado em Capanda, na África, foi determinado através do ensaio de fixação do CaO, que o tempo máximo de estocagem do material seria de 180 dias (EQUIPE DE FURNAS, Lab. de concreto, 1997).

Andriolo (2005), que também participou dos estudos da barragem de Capanda, relata que no transcorrer da construção da barragem de Itaipu (1975-1982) começou-se a incorporar finos de basalto ao concreto convencional e compactado com rolo. Isto se deu após se observar o acúmulo diário deste produto junto às unidades de britagem a uma taxa de 10 t/h a 15 t/h. Os estudos mostraram melhorias significativas nas características tecnológicas do concreto, porém, sem se caracterizar físico-quimicamente a ação dos finos do então chamado "pó pedra".

CASTRO et al (1997), estudando a influência de agregados pulverizados na redução da reação álcali-agregado, registra que uma substituição de 15% a 20% de areia artificial de basalto pelo próprio agregado pulverizado, mantendo-se constante o consumo de cimento, provocou uma redução significativa da expansão, com o aumento dos teores, embora os valores tenham permanecido acima do critério de 0,11% aos 12 dias, fixado pela ASTM C-1260.

Salles; Oliveira; Andriolo (1997), relatando o uso de finos de britagem de basalto na redução da expansão devido à reação álcali-agregado, substituindo cimento portland em teores de 10% a 30%, registram entre outras observações:

- A obtenção de areia artificial resulta num teor de finos de 12% a 16% (britador tipo Impactor) ou 8% a 14% (rebritagem com "Hidrofine");

- A cal fixada pelos finos de basalto atingiu índices superiores ao do material pozolânico (cinza, volantes), o que evidencia a pozolanicidade do material;
- A finura do pó de britagem é determinante para a eficiência na prevenção da reação álcali-agregado.

Estes relatos mostram que o agregado de origem basáltica não pode ser considerado inerte, podendo interagir, tanto física quanto quimicamente, com as demais fases do concreto.

Trabalhos como o de Tasong et al (1998) realçam o papel desenvolvido pelos agregados basálticos com respeito à interação química com o cimento. Quando comparados com calcário, areia silicosa e quartzito, o basalto se mostrou mais reativo. A análise mineralógica do basalto estudado, determinada por difração de Raios X, mostrou a seguinte composição: plagioclásio (albita e anortita), sanidina (feldspato potássico), piroxênio (augita) contendo pouco quartzo, brucita e argilominerais. A composição química foi determinada por fluorescência de Raios X (XRF) e revelou teor de  $\text{SiO}_2$  de 50,14%,  $\text{Na}_2\text{O}$  de 2,92% e  $\text{K}_2\text{O}$  de 0,47%.

O experimento de Tasong consistiu em comparar duas suspensões contendo pó de basalto. Uma suspensão foi preparada com a adição de 25 g de pó de basalto, com diâmetro médio inferior a 100  $\mu\text{m}$ , em um frasco contendo 150 ml de uma solução (1:4) de cimento Portland comum. A segunda suspensão consistiu em adicionar 25g de pó de basalto em 150 ml em de água deionizada.

Os frascos contendo as suspensões foram agitados levemente e mantidos a uma temperatura de 70°C. As suspensões foram analisadas ao final de 1, 3, 7 e 28 dias e comparadas entre si.

A comparação foi estabelecida através da determinação do teor dos principais cátions e íons presentes na suspensão. A análise se deu sobre os filtrados de ambas as suspensões utilizando-se equipamento de plasma induzido (ICP) e espectrometria de emissão atômica (AES), bem como sobre o resíduo utilizando-se equipamento de difração de Raios-X (XRD). O resultado da análise por DRX está na tabela 4.5.

**Tabela 4.5 -** Resumo dos resultados da difração de Raios-X para o agregado basáltico (TASONG et al, 1998)

Condição do Agregado	Rocha original	Resíduo água deionizada	Resíduo solução de cimento
Resultado análise por Difração de raio X	Feldspato (sanidina), plagioclásio (albita e anortita), piroxênio (augita), quartzo, olivina, calcita e argilominerais (hidrobiotitas, vermiculita, illita, caulinita, montmorilonita, mordenite-cálcica e clorita)	Sanidina, albita e anortita, augita, quartzo, olivina, calcita e argilas (illita, caulinita, montmorilonita, mordenite-cálcica e clorita), CSH e $\alpha\text{C}_2\text{AH}_8$	Sanidina, albita e anortita, augita, quartzo, olivina, calcita, gipsita, argilas (illita, caulinita, montmorilonita, mordenite-cálcica e clorita), CSH e $\alpha\text{C}_2\text{AH}_8$ , $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ e etringita

A análise da suspensão em água deionizada mostrou que o pó de basalto liberou teores muito significativos de  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$ . Os íons  $\text{Ca}^{2+}$  foram liberados em teores intermediários e os íons  $\text{K}^+$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  em menores proporções. Esta é uma situação que se aproxima bastante do resultado da ação de processos intempéricos.

Em relação à suspensão do pó de basalto na solução contendo cimento observou-se que o basalto removeu grandes quantidades de  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  liberando quantidades significativas de  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ . Este é um indicativo bastante importante de que o basalto desenvolve uma significativa interação química em sua superfície.

A remoção de  $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  provavelmente se deve à formação de silicatos hidratados de cálcio, bem como sulfatos, na lâmina superficial de hidratação das partículas de basalto.

Fica claro a partir dos resultados da análise do resíduo dos filtrados, tabela 4.5, que o basalto sofreu mudanças químicas significativas, inclusive com formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

#### 4.11 MOAGEM FINA E ULTRANFINA

A moagem fina e ultrafina diferenciam-se pela dimensão final do material. Enquanto na moagem fina as partículas do material resultante têm dimensões na ordem de 100  $\mu\text{m}$ , na moagem ultrafina estas ficam abaixo de 10  $\mu\text{m}$ .

O processo fundamental envolvido na redução do tamanho das partículas é o da quebra, que resulta em partículas de diversos tamanhos e formatos irregulares.

A superfície recém criada, devido à quebra dos grãos não está em equilíbrio, mas ativa química e fisicamente em função de falhas, transposições e partes amorfas no sistema cristalino (WELLENKAMP, 1999).

À medida que se reduz o tamanho da partícula torna-se mais difícil quebrá-la, por isso a moagem ultrafina exige esforços repetitivos (SCHÖRNERT, k., 1993 apud WELLENKAMP,1999).

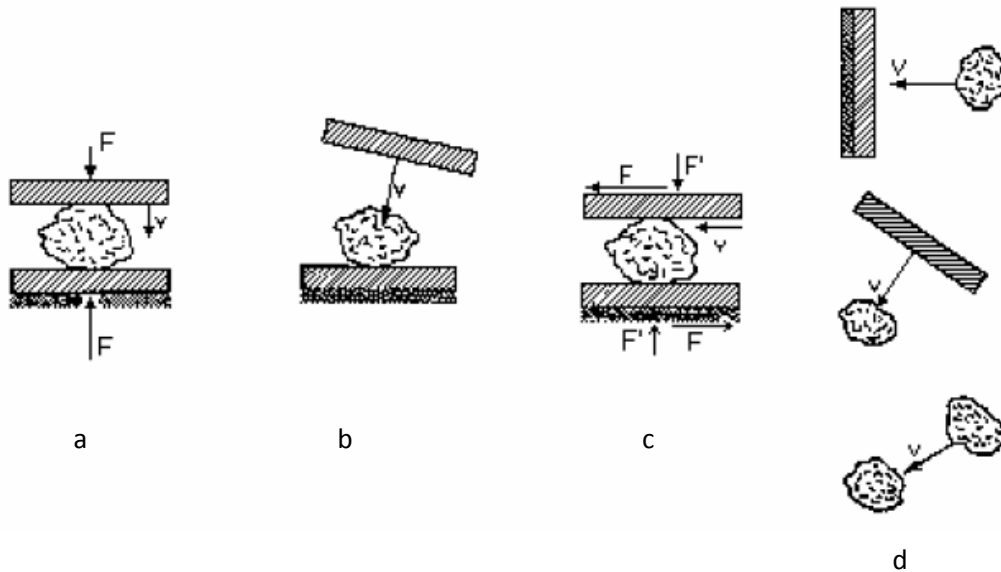
Embora não exista um limite teórico de cominuição, na prática ele é alcançado. Esta limitação ocorre em função de dois fatores (HESS, W.; SCHÖNERT, K., 1981; STEINER, K., 1971 apud WELLENKAMP, 1999):

- Ainda não se desenvolveram equipamentos que possam imprimir o esforço adequado à cominuição de frações submicrométricas;
- Nas faixas submicrométricas ocorre o chamado equilíbrio de cominuição seguido de agregação do material (HESS, W.; SCHÖNERT, K., 1981; STEINER, K., 1971 apud WELLENKAMP, 1999).

A principal função de um moinho é possibilitar a aplicação das forças mecânicas adequadas à cominuição do material a ser processado, garantindo a quebra das partículas.

Os principais esforços mecânicos envolvidos no processo de moagem estão descritos na figura 4.16

**Figura 4.16** - Detalhes dos esforços entre dois planos utilizados nos equipamentos de moagem: a) pressão, b) impacto, c) arraste e d) choque Adaptado de Wellenkamp (1999)



Em função do tipo de esforço aplicado e do tipo de moagem (fina ou ultrafina) pode-se classificá-los conforme a tabela 4.6 adaptada de Wellenkamp (1999).

Para facilitar a moagem, são utilizados aditivos que, através da redução das forças de adesão entre as partículas, evitam a formação de agregações e aderências.

A moagem prolongada pode provocar a modificação ou reformulação (planejada) da estrutura cristalina dos materiais, sendo utilizada na produção de materiais avançados. Mendelovici, E. (1992 apud WELLENKAMP, 1999).

Os moinhos industriais têm suas câmaras revestidas com materiais resistentes como: metais duros, carbetos de tungstênio, óxido de alumínio, carbetos de silício e dióxido de zircônio. O objetivo é evitar a contaminação dos materiais, especialmente dos mais resistentes e abrasivos, pela abrasão da carcaça ou do meio moedor.

**Tabela 4.6** – Classificação dos moinhos quanto ao tipo de esforço empregado e ao tipo de moagem (WELLENKAMP, 1999).

Moinho	Esforço				Granulometria*	Ambiente
	Pressão	Arraste	Impacto	Choque		
<b>Moinhos com meio moedor</b>						
a) Cilíndricos		X	X		FINA	SECO/ÚMIDO
b) Vibratórios		X	X		FINA	SECO/ÚMIDO
c) Planetários	X	X			ULTRAFINA	SECO/ÚMIDO
d) De Atrição		X			ULTRAFINA	ÚMIDO
<b>Moinhos de Choque</b>						
<b>1. Moinhos com rotor</b>						
a) Universais				X	FINA	SECO
b) De Pinos				X	ULTRAFINA	SECO
c) De Rotor				X	ULTRAFINA	SECO
<b>2. Moinhos a jato</b>						
a) Oval				X	ULTRAFINA	SECO
b) Espiral				X	ULTRAFINA	SECO
c) Contra Fluxo				X	ULTRAFINA	SECO
<b>Moinhos de Rolos Verticais</b>	X	X			FINA	SECO
<b>Moinhos de Rolos de Alta pressão.</b>	x				FINA	SECO

Obs: \* Granulometria fina < 100 µm ; ultrafina < 10 µm.

Carles-Giberges, A. et al (2008), num experimento que envolveu a pulverização de agregados de diversos tipos litológicos e de resíduos de vidro plano, relatam a composição química destes, antes e após a pulverização. O objetivo da cominuição foi obter superfícies específicas que variaram de 100 m<sup>2</sup>/kg a 650 m<sup>2</sup>/kg.

Embora o autor não relate o método de cominuição utilizado, pode-se perceber que ocorreram variações na composição química do agregado e do resíduo de vidro após a cominuição (Tabela 4.7). Estas variações foram observadas em todos os ensaios realizados. Fica evidente que o teor de algumas espécies pesquisadas diminuiu,

como é o caso do anidrido silícico ( $\text{SiO}_2$ ), e o de outras aumentou, como o ocorrido com o trióxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

**Tabela 4.7 – Composição química dos agregados antes e após a cominuição (CARLES-GIBERGES, A. et al, 2008)**

Ensaio	B	b	T	t	O	o	G	g
Perda ao fogo (PF) (%)	0,70	1,10	34,70	34,90	5,50	6,00	0,40	0,70
Anidrido silícico ( $\text{SiO}_2$ ) (%)	94,10	87,70	20,00	15,40	93,0	92,70	72,10	66,70
Trióxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (%)	1,60	4,00	1,30	1,70	0,00	0,00	1,00	0,70
Óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) (%)	0,20	0,40	40,60	43,60	0,20	0,20	6,30	7,20
Óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) (%)	0,10	0,20	1,20	1,50	0,10	0,10	3,70	4,10
Óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (%)	0,30	1,00	0,60	1,10	0,20	0,30	0,10	0,10
Óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) (%)	0,20	0,10	0,40	0,50	0,20	0,20	12,70	13,40
Óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) (%)	0,70	0,90	0,40	0,50	0,10	0,10	0,10	0,20
Trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ) (%)	0,10	0,10	0,30	0,20	0,90	1,10	0,40	0,70

Obs: B: metaquartzito; b: Pó de metaquartzito; T: calcário silicoso; t: pó de calcário silicoso; O: agregado opalínico; o: pó de agregado opalínico; G: resíduos de vidro planos (janelas); g: pó de resíduos de vidro plano.

---

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

**U**ma vez que foram determinados os objetivos deste estudo, com base na revisão de literatura, pode-se estabelecer um programa experimental para atingi-los. O objetivo deste capítulo é descrever este programa.

### 5.1 MATERIAIS

#### 5.1.1 Basalto

**F**oram selecionadas para este estudo duas jazidas de basalto diferentes na região norte do Paraná, integrantes da Formação Serra Geral. O interesse no estudo do basalto deve-se ao fato de que o mesmo é abundantemente encontrado na Região Sul, sendo amplamente utilizado como agregado graúdo, e mais recentemente, como agregado miúdo no âmbito da construção civil.

#### ➤ **Amostra 1**

A primeira amostra provém de uma pedreira situada na cidade de Apucarana e foi utilizada, tanto na preparação da areia para a confecção das barras de argamassa no teste acelerado, preconizado pela NBR 15577, quanto na preparação do pó ultrafino de basalto. Neste estudo esta amostra foi designada como "BASALTO BA".

Este material foi selecionado pelo fato de que, em estudos anteriores ainda não publicados, o agregado basáltico proveniente de Apucarana mostrou-se mais reativo que os demais pesquisados nas regiões norte e noroeste do Paraná.

A amostra foi coletada na dimensão máxima de pedrisco, para que a mesma não necessitasse ser rebrita para a obtenção das diversas frações granulométricas necessárias à execução do ensaio de reatividade álcali-agregado, possibilitando a

separação apenas por peneiramento. O material britado foi coletado diretamente da esteira posicionada junto britador. A massa total da amostra coletada foi de 40 kg.

### ➤ **Amostra 2**

A segunda amostra provém de uma pedreira de Londrina, cujo material revelou-se, em estudo anterior ainda não publicado, menos reativo que o proveniente de outras jazidas pesquisadas nas regiões Norte e Noroeste do Paraná.

A amostra foi coletada a partir de diversos pontos de um monte do material, denominado comercialmente de "talco", o qual se encontrava recoberto por lona, a fim de evitar a ação do intemperismo. As diversas porções coletadas foram homogeneizadas e separou-se uma amostra total de 40 kg.

O material amostrado encontrava-se na dimensão de filer ou microfino, com superfície específica de 111 m<sup>2</sup>/kg, o que facilitou a obtenção do material pulverulento apenas por peneiramento.

Após o peneiramento na peneira nº 200 (75 µm), a superfície específica do material amostrado elevou-se para 212 m<sup>2</sup>/kg. A fração resultante deste peneiramento recebeu a designação de "BASALTO BL" e foi utilizada, em conjunto com o material pulverulento obtido da amostra "BASALTO BA", na preparação de pó ultrafino para a verificação da atividade pozolânica e na composição dos cimentos experimentais visando o estudo da mitigação da RAS.

O procedimento adotado para obter as amostra 1 e 2 não teve por objetivo uma coleta que representasse, de modo genérico, o material "filer" ou o material "pedrisco" vendidos comercialmente nas regiões de Apucarana e Londrina, o que demandaria a realização de uma amostragem mais extensa. O intento da amostragem foi o de obter duas amostras provenientes de regiões, ou jazidas, cujo material basáltico houvesse manifestado anteriormente reatividade com os álcalis do cimento.

### 5.1.2 Cimento Portland

O cimento selecionado para servir de base para a composição dos cimentos experimentais é do tipo CP V ARI, por não apresentar outra adição, além de um percentual de 8% a 10% de fíler calcário, sendo o restante composto por clínquer e sulfato de cálcio .

O cimento CPV ARI é reconhecidamente não mitigador da reação álcali-sílica e, dessa forma, permitiu a observação precisa da influência do pó ultrafino de basalto.

### 5.1.3 Cimentos Experimentais Preparados em Laboratório

Uma vez que o objetivo principal desta pesquisa é a avaliação do potencial de utilização do pó ultrafino de basalto para a composição de um cimento mitigador da reação álcali-sílica, desenvolveram-se, em nível laboratorial, três tipos distintos de cimentos.

Tendo por base o cimento CPV ARI, que não possui qualquer adição além de fíler calcário, conforme descrito anteriormente, foram preparados três ligantes que diferiram entre si apenas pelo percentual de substituição parcial do cimento pelo pó ultrafino de basalto. Os teores de adição escolhidos para compor os cimentos foram 30%, 45% e 60% de pó ultrafino.

Os dois primeiros teores, 30% e 45%, podem dar origem a cimentos classificados como pozolânicos (CP IV). O teor de 60% aproxima-se do teor de escória utilizado na preparação de cimento de alto-forno (CPIII). A Figura 5.1 ilustra os teores utilizados na composição dos cimentos experimentais.

**Figura 5.1** – Teores de adição utilizados na composição dos cimentos experimentais.



## 5.2 MÉTODO

### 5.2.1. Hipótese de trabalho

**A** motivação para este estudo partiu da hipótese de que a adição do pó ultrafino de basalto ao cimento do tipo CPVARI, em níveis usualmente presentes nos cimentos brasileiros normalizados, apresentando uma superfície específica adequada, poderia gerar um cimento inibidor da reação álcali-sílica.

Sendo esta hipótese verdadeira, haveria uma limitação da expansão das barras de argamassa moldadas com agregado reativo, segundo preconizado pela NBR 15.577, em níveis inferiores a 0,10% aos dezesseis dias de ensaio.

### 5.2.2. Delineamento Experimental

**P**ara testar a hipótese lançada definiu-se um programa experimental composto pelos seguintes procedimentos e ensaios:

### 5.2.2.1 Caracterização dos Materiais

Esta etapa foi realizada em paralelo aos demais procedimentos e consistiu em submeter os materiais a análises físicas, mecânicas, químicas e mineralógicas. A tabela 5.1 indica os ensaios utilizados para a caracterização de cada material.

O único material não caracterizado inicialmente foi o CPV ARI, uma vez que o fabricante cedeu a análise física, mecânica e química do produto.

**Tabela 5.1 – Resumo dos ensaios de caracterização dos materiais**

MATERIAL	CARACTERIZAÇÃO		
	QUÍMICA**	PETROGRÁFICA**	FÍSICA e MECÂNICA
<b>BASALTO BL E BA</b>	PF, SiO <sub>2</sub> , CaO, MgO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> Oe	análise petrográfica com determinação da composição modal	<b>Não se aplica*</b>
<b>PÓ ULTRAFINO DE BASALTO BL E BA</b>	PF, SiO <sub>2</sub> , CaO, MgO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> Oe	análise mineralógica por difratometria de Raios-X	<b>análise granulométrica***</b>
<b>CP V ARI</b>	RI, PF, MgO, SO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , CaO, MgO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> Oe	<b>Não se aplica*</b>	finura (#200, #325 e Blaine), massa específica, início e fim de pega, expansibilidade a quente e a frio, resistência à compressão (1, 3, 7, 28 dias)
<b>CIMENTO EXPERIMENTAL</b>	RI, PF, MgO, SO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , CaO, MgO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> Oe	<b>Não se aplica*</b>	finura (#200, #325 e Blaine), massa específica, início e fim de pega, expansibilidade a quente e a frio, resistência à compressão (14,28 e 56 dias)

Obs: \*Tendo em vista o objetivo desta pesquisa. \*\*A análise química e petrográfica das amostras de basalto foram realizadas pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT. A análise granulométrica foi realizada pelo Laboratório de Caracterização de Materiais da USP em colaboração com o IPT.

### 5.2.2.2 Preparação da amostra de pó ultrafino de basalto

Para a obtenção do pó ultrafino utilizou-se um moinho de jatos opostos da marca NOLL, modelo Multino<sup>®</sup>1270 M/S/M (figura 5.2) com o objetivo de obter partículas com o diâmetro médio na ordem de 2  $\mu$  a 3  $\mu$  e assim elevar a superfície específica acima de 1000 m<sup>2</sup>/kg. Dessa forma, o diâmetro médio das partículas fica abaixo de 10  $\mu$ m, o que caracteriza o processo como moagem ultrafina.

Neste equipamento, as partes que têm contato com o material a ser moído são construídas em inox, inox especial, cerâmica, poliamida e poliuretano. Estes revestimentos minimizam a possibilidade de contaminação da amostra.

No moinho de jatos opostos, as partículas são introduzidas na câmara de moagem continuamente, através de uma válvula do tipo borboleta. No interior da câmara, o pó é acelerado e fluidizado, ou seja, as partículas sólidas passam a se comportar como um líquido, permanecendo suspensas. Uma vez aceleradas, as partículas são arremessadas umas contra as outras, provocando a sua quebra.

Na zona de impacto da câmara, forma-se um fluxo ascendente de ar que carrega as partículas em direção a um rotor, responsável por sua classificação. As partículas finas são retiradas do circuito e as grossas retornam pelas paredes da câmara até a região de impacto, para novo ciclo de cominuição.

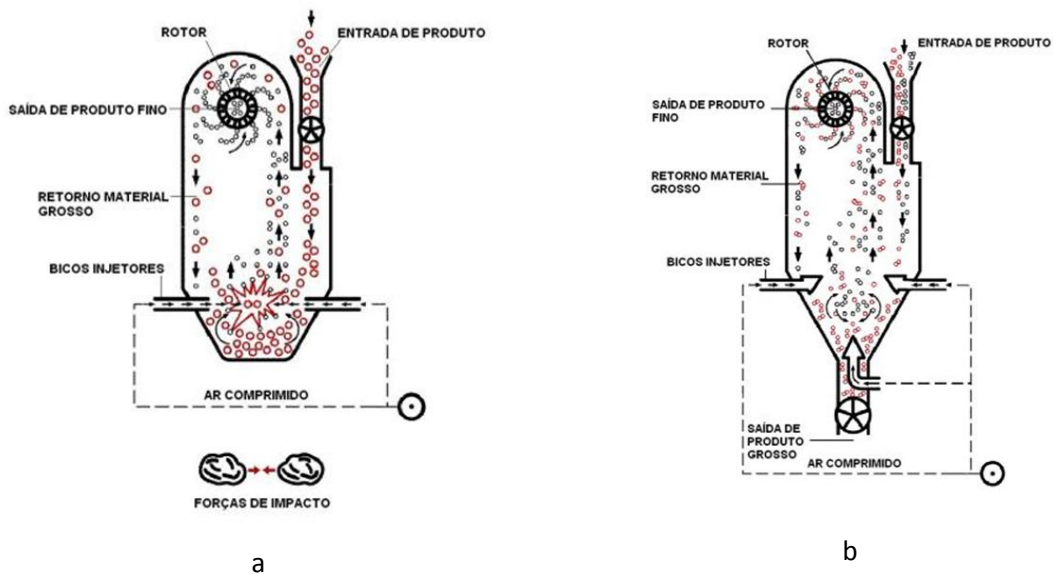
A figura 5.3 apresenta um esquema genérico de um moinho a jato, ilustrando as etapas de cominuição por impacto e de classificação.

Figura 5.2 - Moinho de jatos opostos modelo Multino<sup>®</sup> 1270 M/S/M



Fonte: <http://www.ultrafine.com.br>)

Figura 5.3 - Esquema genérico do moinho de jatos opostos ilustrando em "a" o princípio de funcionamento da moagem e em "b" o princípio de classificação de partículas.



Fonte: <http://www.ultrafine.com.br>

Do processamento no moinho de jatos apostos resultaram duas amostras de basalto micronizado. A primeira amostra composta de BASALTO BL pesando 1249 g e a segunda composta de BASALTO BA pesando 1030 g.

### 5.2.2.3 Verificação da atividade pozolânica

A determinação da atividade pozolânica das amostras em estudo foi realizada através da metodologia estabelecida na NBR 5751, índice de atividade pozolânica com a cal, e através do método Chapelle modificado.

O volume reduzido de pó ultrafino disponível para o seguimento dos ensaios, em função das limitações para a sua obtenção, impôs uma restrição quanto ao método de análise da pozolanicidade. O método de Chapelle modificado, utilizado neste trabalho, requer apenas alguns gramas do material, enquanto o índice de atividade pozolânica com a cal necessita de amostras maiores, superiores a 200 g.

Este ensaio foi realizado com dois objetivos: a) verificar a pozolanicidade das amostras individuais de basalto colhidas em Londrina e Apucarana, e de uma amostra composta de 50% de cada um destes; b) verificar a possibilidade de **misturar** as amostras para aumentar o volume de pó ultrafino e permitir a continuidade do projeto original de pesquisa.

O método Chapelle modificado permite verificar, quantitativamente, a atividade pozolânica de um material que tenha, supostamente, esta propriedade. Ele consiste em suspender uma mistura de 1 grama de CaO e 1 grama de pozolana em 250 ml de água. A mistura é colocada em um frasco Erlenmeyer que permanece aquecido a 90 °C, sob agitação mecânica, por 16 horas. Após este período, a solução é resfriada à temperatura ambiente e recebe a adição de sacarose, sendo novamente agitada. A mistura é então filtrada, recebendo a adição de fenolftaleína, sendo depois titulada contra uma solução de HCl 0,1 N. Os valores podem ser expressos em mg CaO/g de material ou mg de Ca(OH)<sub>2</sub> /g material.

#### 5.2.2.4 Verificação da mitigação da reação álcali-sílica

Nesta etapa adotaram-se os procedimentos descritos na NBR 15.577-4/08, que prevê a determinação da expansão dimensional em barras de argamassa pelo método acelerado, curadas em solução agressiva de Na(OH) 1N.

Na preparação desta etapa foram realizadas, inicialmente, duas operações: mistura das amostras de pó ultrafino do BASALTO BA e BASALTO BL e a separação das frações granulométricas da amostra de BASALTO BA a serem utilizadas na preparação da argamassa necessária à moldagem das barras para o teste de mitigação da reação álcali-sílica.

A mistura das amostras do pó ultrafino dos BASALTOS BA e BL foi processada num misturador tipo "Y" durante 5 minutos, girando a uma velocidade média para evitar a formação de grumos decorrentes da exposição à força centrífuga. Cada tipo de basalto foi introduzido na proporção de 50% (Figura 5.4).

Na separação das faixas granulométricas para a preparação da argamassa obedeceu-se os quantitativos descritos na tabela 5.2. As diversas faixas foram obtidas apenas por peneiramento, evitando-se a rebitagem do material, após o que, foram lavadas em água corrente, secas em estufa e armazenadas em recipientes limpos e fechados (Figura 5.5).

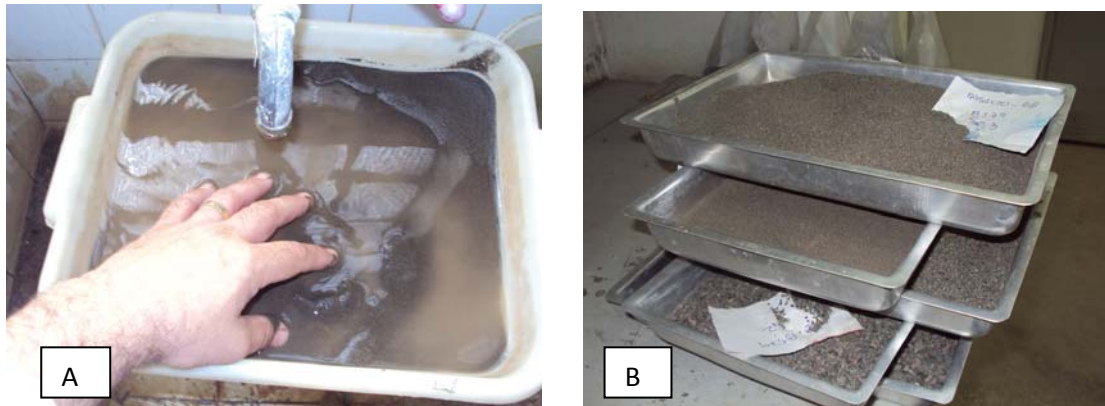
**Figura 5.4** –Misturador tipo “Y” utilizado para a mistura das amostras micronizadas de basalto BL e BA a fim de aumentar o volume de material disponível para realização dos ensaios.



**Tabela 5.2** – Faixas granulométricas e quantitativos para produção da argamassa no teste acelerado de barras

<b>Agregado</b>	<b>Abertura nominal das peneiras (mm)</b>	<b>Massa de Material (g)</b>
<b>Areia de britagem (BASALTO BA)</b>	<b>4,80 – 2,40</b>	<b>99,00</b>
	<b>2,40 - 1,20</b>	<b>247,50</b>
	<b>1,20 - 0,60</b>	<b>247,50</b>
	<b>0,60 - 0,30</b>	<b>247,50</b>
	<b>0,30 - 0,15</b>	<b>148,50</b>

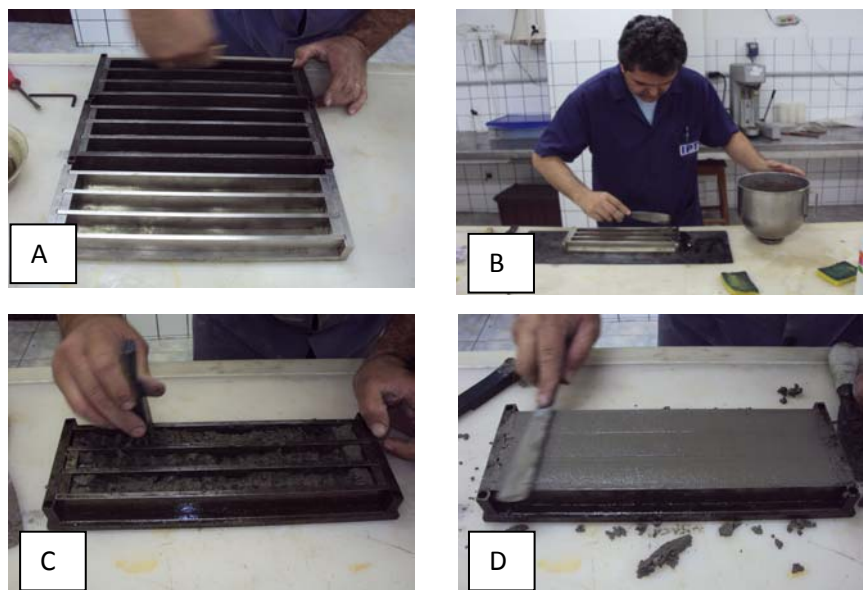
**Figura 5.5** –a) Processo de lavagem dos agregados sob água corrente b) Frações granulométricas já lavadas e secas em estufa aguardando o resfriamento para acondicionamento em recipiente limpo e fechado.



Na preparação da argamassa utiliza-se a proporção cimento: agregado de 1:2,5 e um fator água cimento fixo de 0,47, sendo o cimento utilizado comprovadamente não inibidor da reação álcali-sílica.

Foram moldadas três séries de barras de argamassa, cada uma utilizando os cimentos experimentais previamente preparados, conforme o teor de substituição de cimento por pó ultrafino pré-determinado (Figura 5.6).

**Figura 5.6** – a) Preparação das formas (calibração); b) Iniciando a moldagem das barras pelas extremidades; c) Preenchimento e compactação cuidadosa da argamassa; d) Finalização da moldagem das barras



A tabela 5.3 relaciona os traços em massa das argamassas testadas.

Além das barras de argamassa com os cimentos experimentais, moldou-se um quarta série de barras apenas com o cimento CPV ARI sem a adição de pó ultrafino, sendo esta série a referência para comparação quanto ao efeito mitigador dos cimentos experimentais.

**Tabela 5.3** – Traço das argamassas utilizadas na moldagem das barras no teste acelerado

<b>CIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>CIMENTO CP V ARI (g)</b>	<b>PÓ ULTRAFINO DE BASALTO (g)</b>	<b>ÁGUA (g)</b>	<b>AGREGADO (g)</b>	<b>FATOR A/C</b>
<b>CIMENTO 1</b>	308	132	206,80	990	0,47
<b>CIMENTO 2</b>	242	198	206,60	990	0,47
<b>CIMENTO 3</b>	176	264	206,80	990	0,47
<b>REFERÊNCIA</b>	440	-	206,8	990	0,47

As barras de argamassa foram desmoldadas após  $(24 \pm 2)$ h de intervalo e colocadas para curar imersas em um recipiente com água, cuja temperatura foi elevada gradualmente até  $80,0 \pm 2,0$  °C, permanecendo assim por 24 h. (Figura 5.7a)

Após este período de estabilização, cada barra foi retirada do banho a 80 °C e rapidamente medida, para estabelecer a leitura inicial. Esta operação foi realizada obedecendo-se o tempo máximo de  $15 \pm 5$ s, para evitar o resfriamento excessivo. (Figura 5.7b)

Após a leitura inicial, as barras foram introduzidas num recipiente contendo a solução de NaOH  $(1 \pm 0,01)$ N a  $(80 \pm 2)$ °C, ficando totalmente imersas (Figura 5.8a).

Foram efetuadas leituras aos dezesseis e aos trinta dias, contados a partir da moldagem, com três leituras em datas intermediárias, aproximadamente na mesma hora.

**Figura 5.7** – De A) a C) Barras de argamassa após a desmoldagem; D) Barras de argamassa em banho termo regulador a 80°C.



A expansão média foi calculada a partir das leituras obtidas em três prismas moldados com a mesma argamassa. O relógio comparador utilizado permitiu leituras de 0,001 mm. As diferenças de leitura para o cálculo das expansões foram tomadas com exatidão de 0,002 mm, conforme preconizado pela NBR 15.577-4 para leituras até 0,020 mm. A expansão linear, ou seja, a diferença entre o seu comprimento inicial (leitura zero) e o comprimento na idade considerada, é expressa em porcentagem em relação ao comprimento inicial, com aproximação de 0,001% e a média com aproximação de 0,01% (Figura 5.8b).

**Figura 5.8** –a) Banho termorregulador ajustado para 80° C; b) Registro da tomada do comprimento inicial das barras de argamassa. A mesma operação se repetiu ao longo do ensaio.



### 5.2.3 Unidades de Análise e Variáveis Observadas

**A** fim de observar o potencial de mitigação da RAS dos cimentos experimentais, utilizaram-se duas unidades de análise: corpos de prova cilíndricos e barras de argamassa. Cada uma destas unidades de análise foi utilizada para observar a expressão de uma variável específica.

- Os Corpos de prova cilíndricos, de 50 mm de diâmetro por 100 mm de comprimento, foram utilizados para determinação da atividade pozolânica com a cal (IAP). Foram moldados 3 corpos de prova para cada amostra do pó ultrafino de basalto testada, em função das diferentes superfícies específicas. O objetivo do ensaio foi determinar a menor superfície específica, a partir da qual o material pulverulento de basalto desenvolvesse a atividade pozolânica mínima, conforme preconizado pela NBR 12653. A variável observada foi a resistência à compressão dos corpos de prova aos 7 dias de idade, a qual foi correlacionada à superfície específica (blaine) do pó utilizado na preparação da argamassa.
- As barras de argamassa de 25 mm x 25 mm x 285 mm foram empregadas no teste acelerado para avaliar a reatividade do agregado basáltico e também o potencial de mitigação da RAS pelo pó ultrafino. Conforme determina a norma NBR 15577-4, foram moldadas 3 barras de argamassa para avaliar cada nível de adição de pó ultrafino utilizado na preparação dos cimentos experimentais. A variável observada foi a variação dimensional das barras. Foram realizadas leituras dos comprimentos das barras no décimo sexto e trigésimo dia após a moldagem, e em mais 3 datas intermediárias para cada período, ou seja, 3 leituras entre os dias primeiro e décimo quinto e outras 3 leituras entre o décimo sétimo e vigésimo nono dia. A partir destas leituras foram calculadas as variações dimensionais desenvolvidas sob cura agressiva (solução de NaOH 1N a 80°C).

Os resultados do ensaio acelerado de barras foram submetidos à análise estatística de experimentos fatoriais (neste caso, para 2 fatores: número de dias e percentual de adição) com objetivo de confirmar a eficácia de cada cimento, mais apropriadamente, de cada nível de adição de pó ultrafino em promover a redução da expansão das barras em comparação ao ensaio controle realizado com o CPV ARI sem adição de pó ultrafino de basalto.

## 6 RESULTADOS

**E**ste capítulo apresenta sinteticamente os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos ligantes e agregados, bem como a avaliação da atividade pozolânica do pó ultrafino de basalto e da verificação quanto ao seu potencial para mitigar a reação álcali-sílica.

### 6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 6.1.1 Caracterização Física, Química e Mecânica dos Ligantes

**A**s Tabelas 6.1.1 e 6.1.2 apresentam os resultados dos ensaios físicos, químicos e mecânicos dos ligantes

**Tabela 6.1.1 – Resultados dos ensaios químicos para caracterização dos ligantes**

Determinações***	Resultados e limites especificados			
	CP V ARI	CPV ARI (NBR 5733)	CIMENTO EXPERIMENTAL (49% ADIÇÃO)	CIMENTO POZOLÂNICO (NBR 5736)
Resíduo insolúvel	0,20	≤1,0	44,5**	-
Perda ao fogo	1,70	4,5	3,70	4,50
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,13		1,30	
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,84		0,90	
Trióxido de enxofre(SO <sub>3</sub> )	3,13	≤3,5* / 4,5**	2,00	4,00
Equivalente alcalino (Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> )	0,68		1,89	-
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	20,00		33,30	-
Trióxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4,36		9,60	-
Trióxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,57		7,50	-
Óxido de cálcio (CaO)	62,51		37,40	-
Óxido de magnésio (MgO)	1,66	6,50	2,90	6,50
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0,55	≤3,00	3,70	3,00

Obs: \*Teor de trióxido de enxofre quando C<sub>3</sub>A do clínquer ≤ 8,0%; \*\* Teor de trióxido de enxofre quando C<sub>3</sub>A do clínquer > 8,0%. \*\* Determinação pela NBR NM 22/04; \*\*\*Resultados em porcentagem. Estes ensaios foram realizados no laboratório do fabricante do CP V ARI, majoritariamente por fluorescência de Raios-X.

**Tabela 6.1.2 – Resultados dos ensaios físicos e mecânicos para caracterização dos ligantes.**

Determinações	Resultados e limites especificados			
	CP V ARI	CP V ARI (NBR 5733)	CIMENTO EXPERIMENTAL (49% ADIÇÃO)	CIMENTO POZOLÂNICO (NBR 5736)
Água de consistência (%)	28	-	35	-
Início de pega (min)	135	≥60	300	≥ 60
Fim de pega (min)	275	-	405	≤ 720
Expansibilidade a quente (mm)	0,00	≤ 5,00	-	≤ 5,00
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,11	-	-	-
Área específica (Blaine - m <sup>2</sup> /kg)	455	> 300	770	-
Material retido # 200(%)	0,12	≤ 6,00	2,32	≤ 8,00
Material retido # 375(%)	1,75	-	3,90	-
Resistência 1 dia (MPa)	27,00	14,00	-	-
Resistência 3 dias (MPa)	40,30	24,00	-	≥ 8 * ≥10**
Resistência 7 dias (MPa)	45,70	34,00	-	≥ 15 * ≥20**
Resistência 14 dias (MPa)	-	-	22,60	-
Resistência 28 dias (MPa)	56,60	-	24,50	≥ 25 * ≥ 32**
Resistência 56 dias (MPa)	-	-	29,40	-
Resistência 91 dias (MPa)	-	-	-	≥ 32 * ≥ 42**

Obs. \* refere-se ao CP IV 25; \*\* Refere-se ao CP IV 32

Os resultados indicam que o CPV ARI utilizado na pesquisa atende aos requisitos da NBR 5733/91 e é composto essencialmente de CaO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO que representam no conjunto mais de 92%.

O resíduo insolúvel obtido pela análise química do cimento indica a fração não clinquerizada da matéria-prima, portanto, trata-se de um valor vinculado ao seu processo produtivo. Este ensaio é executado pela NBR NM 15/04, sendo aplicável sem adição de pozolanas como os tipos CP-I, CP-II-E, CP-II-F e CP-V-ARI.

A NBR NM22/04 prevê a determinação do resíduo insolúvel por ataque ácido a frio, sendo o ácido diluído e o resultado expressa, praticamente, o teor de pozolana presente nos cimentos CP-II-Z e CP-IV.

Os resultados obtidos (tabela 6.1.1) indicam claramente que o CP-V-ARI não tem pozolana ao passo que o cimento experimental tem-se 44,5% de material inerte. A solubilização parcial dos finos de basalto no ataque ácido subestima o teor de adição assim quantificado.

### 6.1.2 Caracterização Química dos Agregados e Adições

A tabela 6.1.3 resume as principais características químicas das amostras de agregado basáltico provenientes de Londrina/PR (BASALTO BL) e de Apucarana/PR (BASALTO BA) e do pó ultrafino resultante da micronização do material pulverulento.

**Tabela 6.1.3 – Características químicas das amostras de basalto e de pó micronizado utilizados no estudo**

Determinações*	BASALTO BL	BASALTO BL MICRONIZADO	BASALTO BA	BASALTO BA MICRONIZADO	BASALTO BA + BL MICRONIZADO
Perda ao fogo (PF)	1,73	2,38	2,53	2,90	2,60
Anidrido silício (SiO <sub>2</sub> )	50,3	51,0	49,8	51,3	50,9
Óxido de cálcio (CaO)	10,8	9,95	9,17	8,52	9,33
Óxido de magnésio (MgO)	6,54	4,79	4,78	4,36	4,64
Óxido férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	12,5	11,4	16,7	14,1	12,7
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	14,1	15,5	12,7	14,2	15,0
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	2,30	2,64	2,34	2,54	2,60
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,80	1,02	1,18	1,25	1,18
Equivalente alcalino (Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> )	2,83	3,31	3,11	3,36	3,37
Óxido de sódio solúvel (Na <sub>2</sub> O)	-	0,02	-	0,04	0,03
Óxido de potássio solúvel (K <sub>2</sub> O)	-	<0,01	-	<0,01	<0,01
Álcalis solúveis	-	0,02	-	0,04	0,03

Obs: SO<sub>3</sub> (Trióxido de enxofre): não determinado.\* Resultados em porcentagem.

Os resultados registrados na tabela 6.1.3 apontam a ocorrência de ligeiras alterações no teor de algumas das espécies químicas determinadas após a micronização, incluindo a perda ao fogo. Algumas espécies químicas apresentaram um leve aumento no seu teor, como é o caso do  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , enquanto outras, como  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , apresentaram redução. Contudo, mesmo com estas variações, manteve-se o perfil típico da composição química de caráter básico do basalto ( $\text{SiO}_2 < 52\%$ ). A origem destas alterações se relaciona, provavelmente, dureza e a densidade dos minerais constituintes do material pulverulento de basalto, no ambiente de fluidização no interior da câmara do moinho de jatos opostos.

Uma vez que as partículas adquirem o comportamento de um fluido no interior da câmara, a diferença de densidade entre os minerais deve influenciar no carregamento das partículas para a sua classificação. Partículas mais leves e menos duras são removidas do sistema com maior facilidade em relação às partículas mais pesadas. Ao mesmo tempo, partículas com teores mais elevados de minerais mais duros, mais resistentes à cominuição, devem permanecer por mais tempo no interior da câmara e podem mesmo, após um certo tempo, serem coletadas como material grosso. Evidentemente, esta é uma suposição que precisa ser submetida a uma validação para elucidar a influência do método de cominuição e classificação das partículas sobre a composição da amostra. Para ilustrar as diferenças de massa específica e dureza dos minerais constituintes do basalto foi elaborada a tabela 6.1.4.

**Tabela 6.1.4 –** Massa específica relativa, dureza e composição química de alguns dos minerais constituintes do basalto BA e basalto BL.

MINERAL	MASSA ESPECÍFICA RELATIVA ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	DUREZA (Mohs)	COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA
LABRADORITA	2,70 -2,7	6,0-6,5	4,56% $\text{Na}_2\text{O}$ , 12,38% $\text{CaO}$ , 30,01% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 53,05% $\text{SiO}_2$
AUGITA	3,20 -3,6	5,0-6,5	1,31% $\text{Na}_2\text{O}$ , 21,35% $\text{CaO}$ , 15,35% $\text{MgO}$ , 3,38% $\text{TiO}_2$ , 8,63% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 6,08% $\text{FeO}$ , 48,30% $\text{SiO}_2$
APATITA	3,10- 3,2	3,1 -3,2	Fosfato de cálcio e flúor/cloro: 41,8% $\text{P}_2\text{O}_5$ , 55,0% $\text{CaO}$ , 1,2% $\text{F}$ , 2,3% $\text{Cl}$ , 0,6% $\text{H}_2\text{O}$
ESMECTITA (MONTMORILONITA)	2,00 -2,70	1,0 -2,0	(Mg, Ca)O. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{Si}_5\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$
HEMATITA	4,90 -5,30	5,5 -6,5	Óxido de ferro: 70,0% de $\text{Fe}$ , 30,0% de $\text{O}$

Fonte: Museu de Minerais e Rochas Heinz Ebert, 2003

Considerando o pó ultrafino de basalto como uma pozolana classe N<sup>12</sup>, verifica-se que ele atende aos requisitos quanto ao teor mínimo de óxido de alumínio, óxido de silício e óxido férrico, perda ao fogo e álcalis disponíveis. A tabela 6.1.5. relaciona os resultados obtidos e as exigências químicas preconizadas pela norma NBR 12653:1992.

**Tabela 6.1.5** - Resumo dos resultados dos ensaios químicos do pó ultrafino de basalto (BA + BL) comparados às exigências químicas da Norma NBR 12653:1992 para materiais pozolânicos

PARÂMETROS/ COMPOSIÇÃO	RESULTADOS ENSAIOS QUÍMICOS	MATERIAL POZOLÂNICO
		CLASSE "N" (NNBR 12653:1992)
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( % min)	77,86	70,00
SO <sub>3</sub> (% Max)	Não avaliado	4,00
Teor de umidade (% max)	Material seco	3,00
Perda ao fogo (% max)	2,60	10,00
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O* (% Max)	0,03	1,50

Obs: Obtido a partir dos teores de óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) e de potássio (K<sub>2</sub>O)

### 6.1.3 Análise Petrográfica e Mineralógica do Basalto

#### 6.1.3.1 Análise petrográfica e mineralógica

A análise das amostras, conforme retratado nas tabelas 6.1.6 e 6.1.7, confirma a classificação petrográfica dos materiais como sendo amostras de basalto. O BASALTO BL exibe uma granulação mais grossa que o tipo BA e apresenta-se praticamente inalterado, ao contrário do BASALTO BA, que se mostra moderadamente alterado por intemperismo, fotos 6.1.1 e 6.1.2.

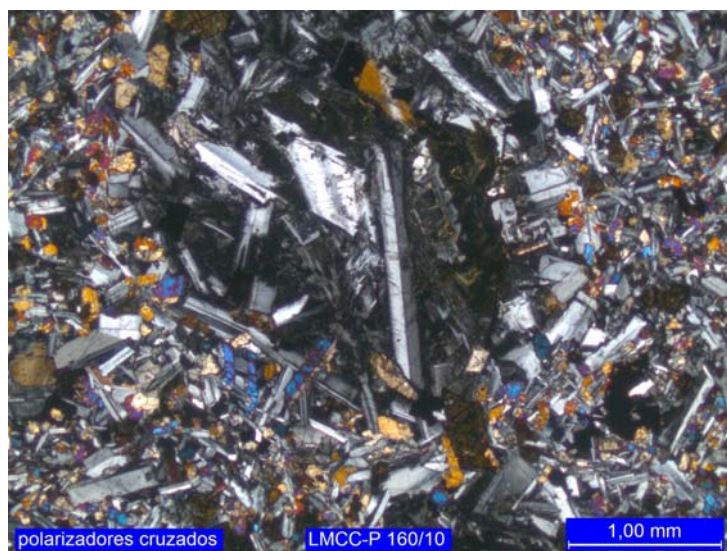
<sup>12</sup> CLASSE "N" refere-se a pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos aplicáveis na NBR 12653:1992. Exemplos: materiais vulcânicos de caráter petrográfico "ácido", "cherts" silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.

A composição de materiais considerados deletérios (vidro vulcânico devitrificado) é inferior a 5% nas duas amostras.

**Tabela 6.1.6 – Síntese das principais características petrográficas da amostra de basalto BL**

Mineralogia	Principal	Plagioclásio labradorita (45% a 50%); clinopiroxênio augita (35% a 40 %); argilominerais verdes e castanhos (5% a 10%); opacos (5%); vidro desvitrificado (< 5%)
	Acessórios	Apatita (traços)
	Secundários	Hidróxido de ferro (-)
Cor		Cinza médio escuro
Estrutura		Maciça
Textura		Intergranular; localmente glomeroporfírica
Granulação		Fina a média (predominantemente fina)
Estado de alteração		Rocha pouco alterada
Grau de microfissuramento		Fraco microfissuramento intragranular, localmente transgranular, em cristais de plagioclásio, localmente preenchidas por sericita
Propriedade Físico-mecânica		Rocha muito coerente
Tipo de Rocha		Ígnea
Classificação petrográfica		Basalto
Reatividade potencial		Potencialmente reativo

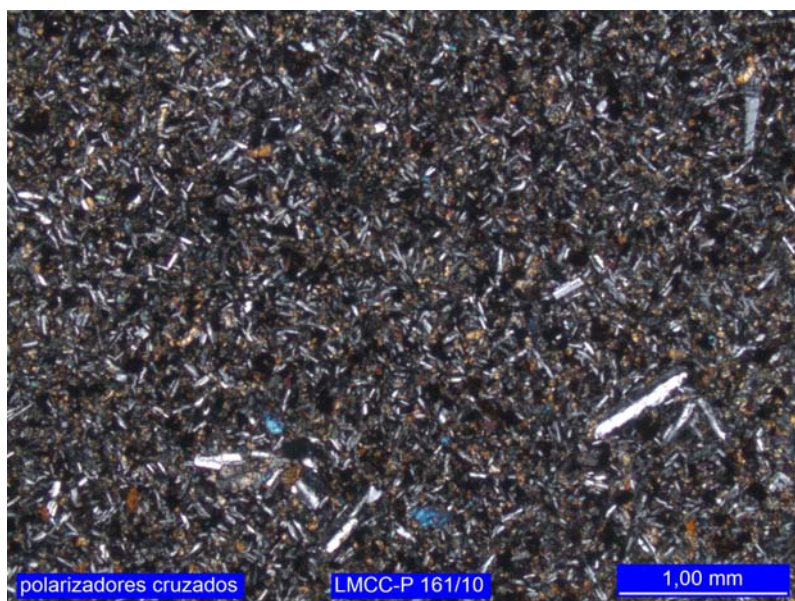
**Figura 6.1** - Fotomicrografia revelando aspecto da textura intergranular do basalto BL, sendo que ao centro apresenta-se glomeroporfirítica.



**Tabela 6.1.7** - Síntese das principais características petrográficas da amostra de basalto BA

Mineralogia	Principal	Plagioclásio labradorita (45% a 50%); clinopiroxênio augita (35% a 40%); argilominerais castanhos (5% a 10%); opacos (5% a 10%); vidro desvitrificado (< 5%)
	Acessórios	Apatita (traços)
	Secundários	Hidróxido de ferro (-)
Cor	Cinza médio	
Estrutura	Maciça	
Textura	Intergranular, microporfirítica	
Granulação	Fina	
Estado de alteração	Rocha pouco a medianamente alterada	
Grau de microfissuramento	Moderado microfissuramento intragranular (segundo clivagens) em plagioclásio, localmente transgranular, comumente preenchidas por sericita	
Propriedade Físico-mecânica	Rocha muito coerente	
Tipo de Rocha	Ígnea	
Classificação petrográfica	Basalto	
Reatividade potencial	Potencialmente reativo	

**Figura 6.2** - Fotomicrografia revelando a textura intergranular microporfírica do basalto BA.



Quanto à análise mineralógica realizada por difratometria de Raios-X, tem-se os resultados registrados na tabela 6.1.8.

A análise por difratometria mostra que o material micronizado, a partir das amostras dos basaltos BL e BA, é constituído predominantemente por feldspatos, com pequenas proporções de piroxênio, hematita e argilominerais, que por sua vez foram identificados como esmectitas e que possuem caráter expansivo quando embebidas em água.

Os Argilominerais verdes ocorrem principalmente na forma de microamígdalas, cujo tamanho varia entre 0,15 mm e 0,4 mm, podendo atingir até 1 mm. Os argilominerais castanhos, em menores proporções, preenchem os espaços intergranulares.

Maísa e Marfil<sup>13</sup>, a partir de sua experiência com o estudo de basaltos da formação Serra Geral na Argentina sugerem, com base nas fotomicrografias, que os argilominerais castanhos possam ser nontronita e os de coloração verde celadonita (informação pessoal).

---

<sup>13</sup> MAIZA, P. J., MARFIL REATIVIDADE DE BASALTOS. [mensagem pessoal]. Mensagens recebidas por jsnfilla@uol.com.br em 05 de out. 2010 e 12 de out. 2010

Tabela 6.1.8 – Análise mineralógica do pó de basalto micronizado

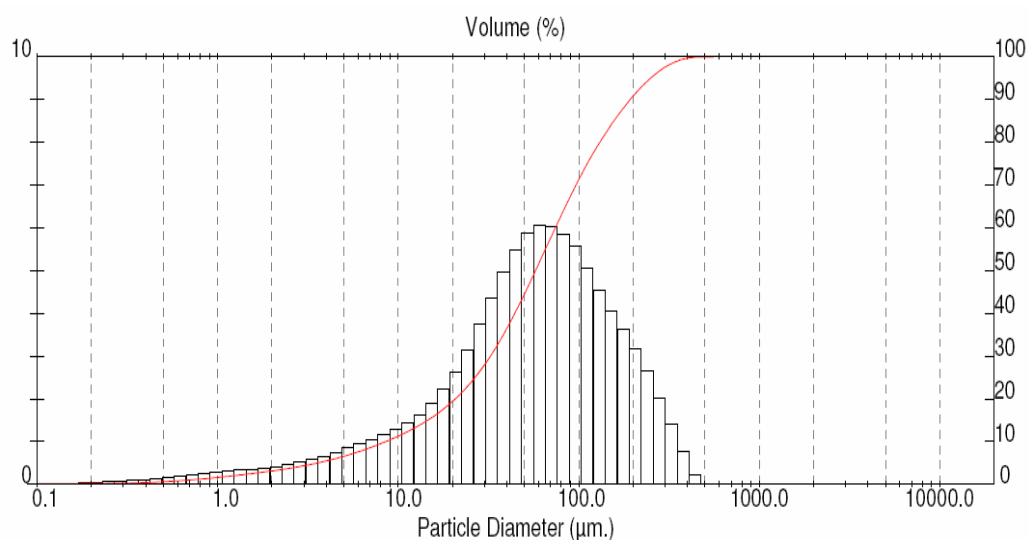
MATERIAL		RESULTADO
<b>Basalto BL micronizado</b>	Amostra total	Feldspato (essencial), argilominerais (subordinado), piroxênio e hematita (acessórios)
	Fração Argila	Argilomineral do grupo das esmectitas (expansivos em água)
<b>Basalto BA micronizado</b>	Amostra total	Feldspato (essencial), argilominerais, piroxênio e hematita (acessórios)
	Fração argila	Argilomineral do grupo das esmectitas (expansivos em água)

Obs. A análise da fração argila das amostras de basalto colhidas na dimensão de pedrisco, ou seja, não micronizadas, diferiu da análise das amostras micronizadas apenas pela identificação de traços de illita.

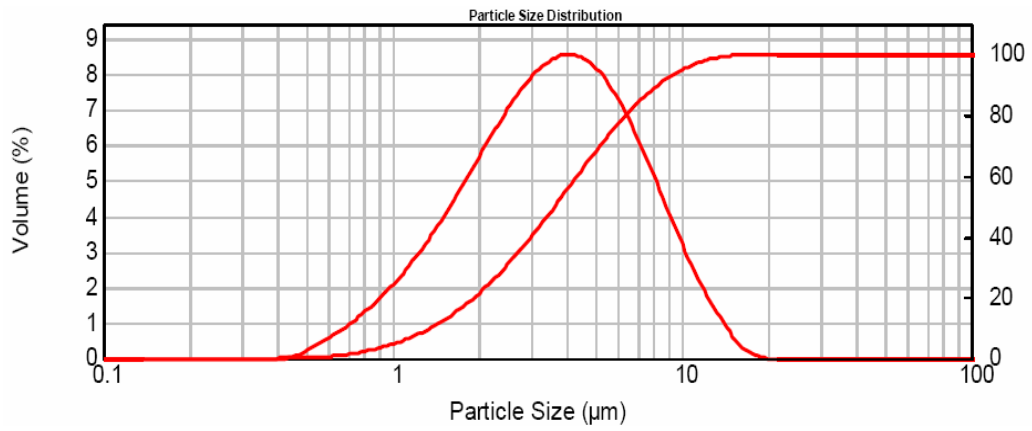
#### 6.1.4 Análise Granulométrica

Com o objetivo de conhecer a distribuição granulométrica dos materiais e a eficácia do processo de moagem foram realizadas análises granulométricas a laser. Os resultados encontram-se na tabela 6.1.7 e nos gráficos das figuras 6.3 a 6.6.

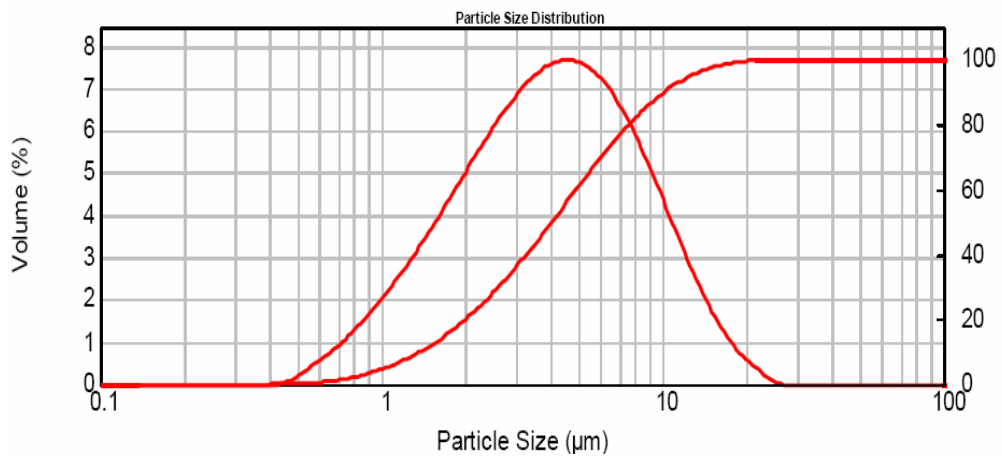
**Gráfico 6.1 - Distribuição granulométrica do material pulverulento de basalto – Basalto BL**



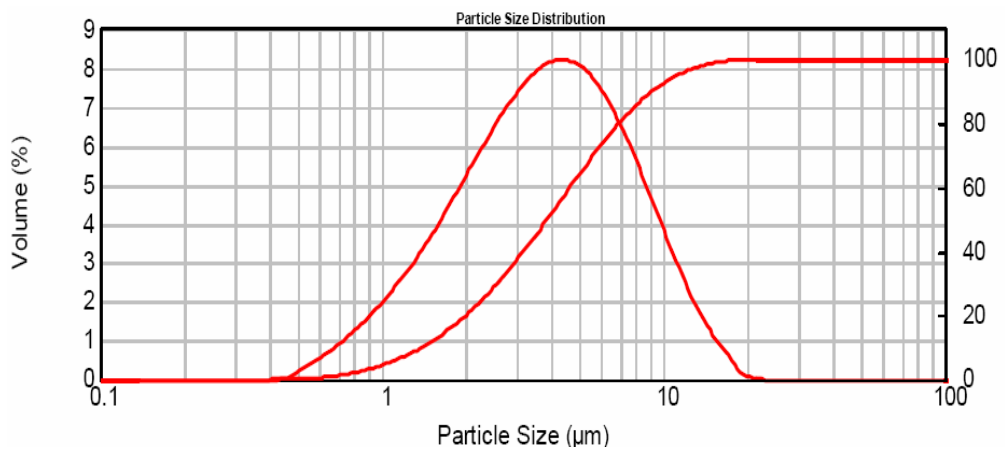
**Gráfico 6.2-** Distribuição granulométrica do Basalto BL – micronizado.



**Gráfico 6.3 -** Distribuição granulométrica do Basalto BA–micronizado.



**Gráfico 6.4 -** Distribuição granulométrica do Basalto BA + BL – micronizado.



**Tabela 6.1.9 – Resultado da análise granulométrica em relação aos diâmetros obtidos**

MATERIAL	DIÂMETRO ( $\mu\text{m}$ )			
	D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>médio</sub>
Material Pulverulento	8,57	57,65	192,84	82,02
Basalto BA micronizado	1,38	4,03	10,11	5,04
Basalto BL micronizado	1,36	3,63	8,28	4,32
Basalto (BA + BL) micronizado	1,38	3,87	9,08	4,66

Os resultados expressos na tabela 6.1.9 mostram que o processo de micronização foi eficaz em promover a redução da dimensão das partículas resultando, no caso da amostra micronizada já misturada, num diâmetro médio de 4,66  $\mu\text{m}$ , ou seja, cerca de 17 vezes menor. Este fato justifica o aumento da superfície específica de 212  $\text{m}^2/\text{Kg}$  da amostra de material pulverulento original para 1142  $\text{m}^2/\text{kg}$  da amostra micronizada

## 6.2 AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO MATERIAL PULVERULENTO DE BASALTO

**A** atividade pozolânica do material pulverulento de basalto ativado mecanicamente foi verificada através de duas metodologias: Índice de atividade pozolânica com a cal (NBR 5751) e Método de Chappelle Modificado (ABNT NBR 15895:2010)

### 6.2.1 Reatividade com a Cal (IAP)

O resultado do ensaio com a cal (Tabela 6.2.1) mostrou que o aumento da superfície específica, através da ativação no moinho pulverizador vibratório de anéis, foi insuficiente para atingir a resistência mínima, aos 7 dias, preconizada pela norma NBR 12653, que é de 6 MPa.

**Tabela 6.2.1** - Índice de atividade pozolânica (IAP) com a cal, aos 7 dias, do material pulverulento de basalto (BASALTO BL) moído em moinho pulverizador vibratório de anéis.

Superfície Específica (m <sup>2</sup> /Kg)	IAP *(MPa)
212	n.d.
692	2,10
745	2,00
835	3,10

Obs: n.d. -> não determinada; \* Ensaio realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT

### 6.2.2 Método de Chapelle Modificado

O resultado, conforme tabela 6.2.2, indica que ambas amostras, embora com superfícies específicas elevadas, continuam a apresentar um baixo nível de atividade pozolânica. Em função destes índices de atividade pozolânica situarem-se em patamares muito próximos, evidenciou-se a possibilidade de serem misturadas para compor uma única amostra de material micronizado.

A atividade pozolânica inferida através do ensaio de Chapelle mostra maior influência da amostra de basalto colhida em Londrina, embora adicionadas na mesma proporção, uma vez que o resultado se afastou da média em direção ao valor desta.

**Tabela 6.2.2** – Resultado do ensaio de Chappelle modificado demonstrando o consumo de CaO das amostras de material pulverulento de basalto micronizadas.

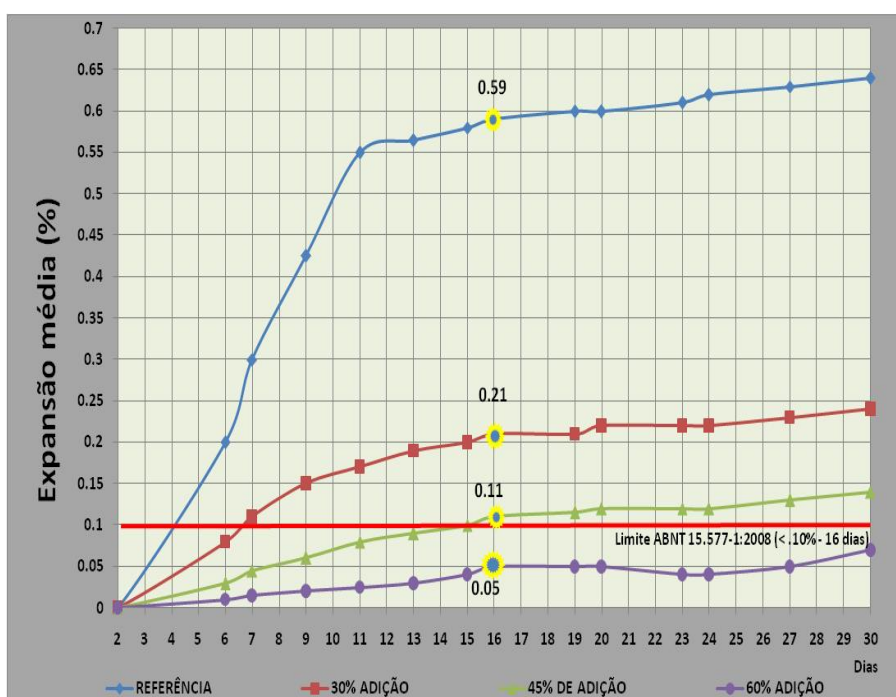
MATERIAL	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (m <sup>2</sup> /kg)	CONSUMO DE CaO (mg CaO/g amostra) (Ensaio Chappelle) *
BASALTO BA	1118	192
BASALTO BL	1149	172
BASALTO BA+BL (50%/50%)	1142	173

Obs:\* Ensaio realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil do IPT

### 6.3 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL MITIGADOR DOS CIMENTOS EXPERIMENTAIS

O resultado do ensaio acelerado de barras mostra que houve uma redução expressiva da expansão linear das barras moldadas com o cimento experimental em relação às barras controle (Gráfico 6.5).

**Gráfico 6.5** - Redução da expansão linear de barras de argamassa moldadas com cimentos contendo diferentes teores de adição de pó micronizado de basalto.



---

## 7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 7.1 ENSAIOS EXPLORATÓRIOS

O objetivo deste tópico é registrar o aprendizado quanto à moagem do material pulverulento de basalto, a matéria prima utilizada neste estudo para a obtenção do pó ultrafino.

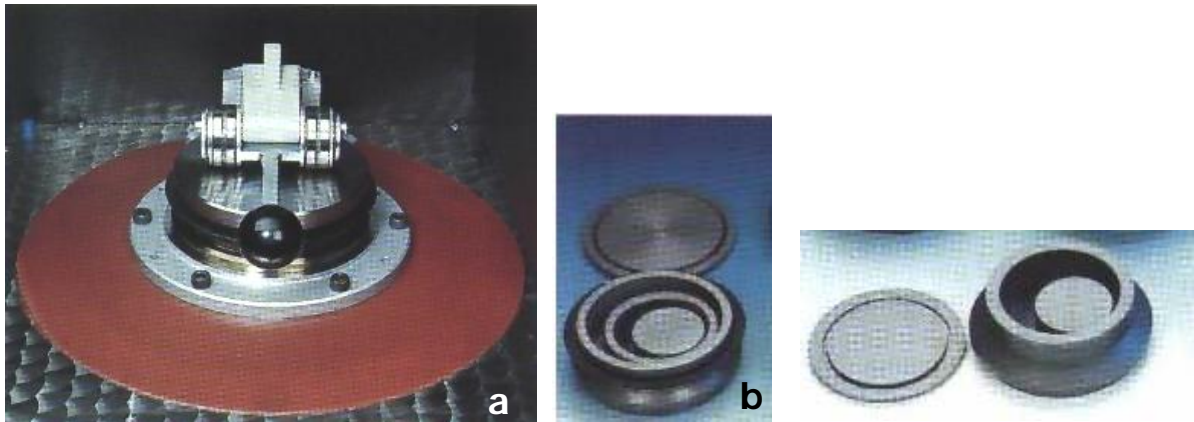
Desde o início das atividades experimentais, vislumbrava-se certa dificuldade em moer o material pulverulento a fim de aumentar a sua superfície específica e, possivelmente, a sua atividade pozolânica. A dificuldade esperada estava relacionada à dureza da composição mineral da rocha (principalmente labradorita e augita) que alcançam 6,0 a 6,5 na escala Mohs.

Tendo por base informações de literatura, propôs-se inicialmente estudar a atividade pozolânica do material pulverulento de basalto com superfícies específicas de 600 m<sup>2</sup>/kg, 800 m<sup>2</sup>/kg e 1000 m<sup>2</sup>/kg.

As primeiras tentativas de cominuição foram realizadas em um moinho pulverizador vibratório de anéis modelo MPV1 da marca Renard do IPT. Este equipamento é composto basicamente por uma panela contendo um anel e um peso, que ao serem agitados, provocam a moagem por impacto e arraste (WELLENKAMP, 1999). A capacidade de moagem das panelas é de cerca de 120 g por ciclo (figura 7.1)

O material pulverulento foi peneirado a seco na peneira de malha nº 200, antes de ser submetido à moagem. Esta operação foi necessária para uniformizar o diâmetro inicial e mostrou que, do material bruto (filer), apenas 44,78% possuía diâmetro inferior a 0,075 mm, permanecendo o restante retido nesta peneira. Provavelmente, o teor de material passante na peneira nº 200 seria um pouco maior, caso o peneiramento houvesse sido realizado por via úmida. Concluída a moagem, fez-se novo peneiramento a seco através da peneira nº 270.

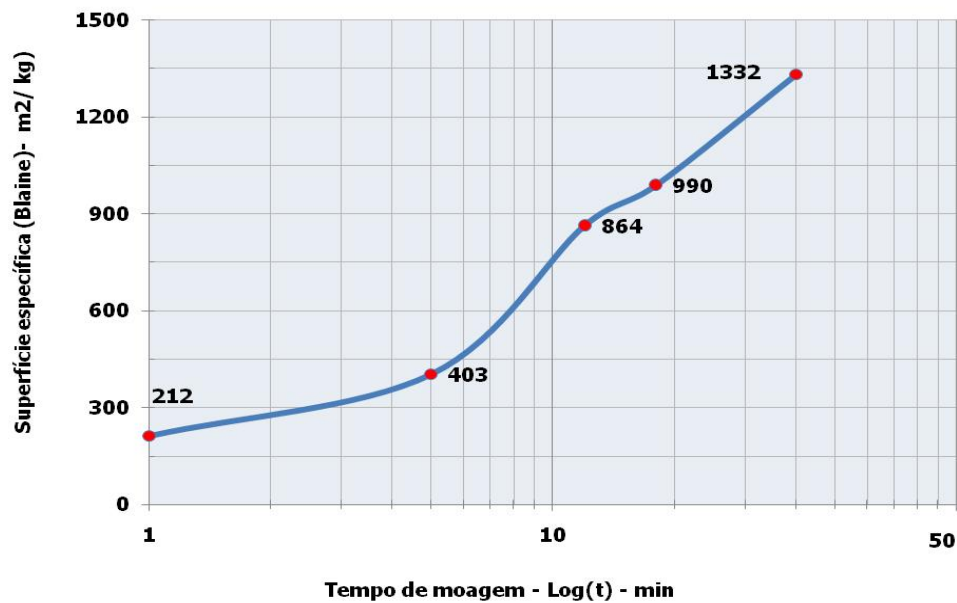
**Figura 7.1** – a) Visão geral do mecanismo de fixação das placas de um moinho pulverizador vibratório; b) Conjunto de placas.



Fonte: [http:// www.dairix.com.br/equipaments/55](http://www.dairix.com.br/equipaments/55)

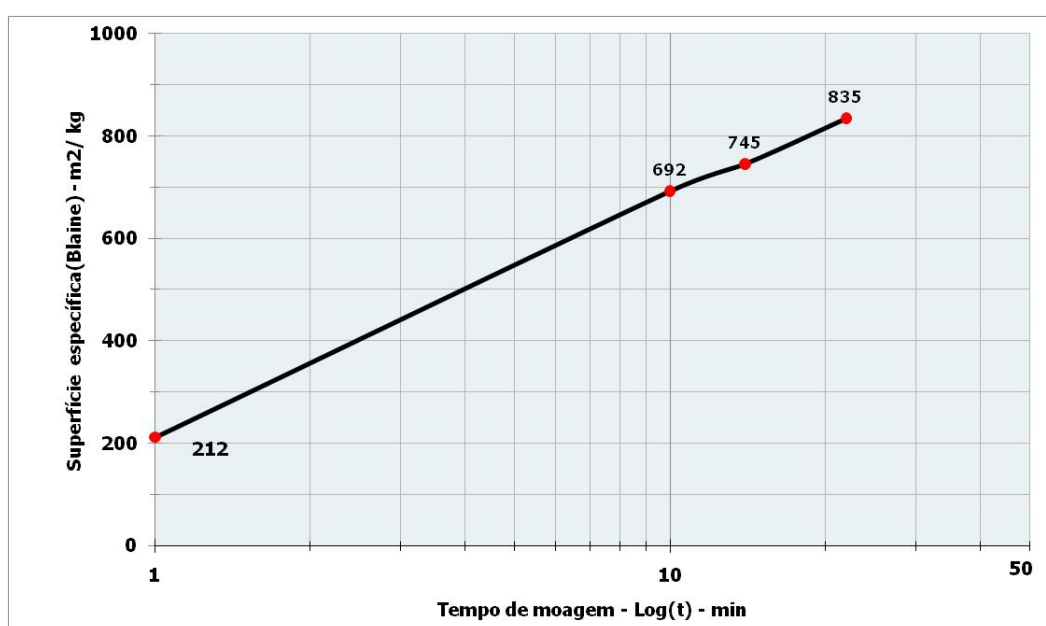
Para estabelecimento do tempo necessário de moagem, que deve ser o menor possível, foram feitas sondagens em ciclos com duração de 5 a 60 minutos. O gráfico 7.1 registra o resultado das sondagens iniciais para ciclos de até 40 minutos.

**Gráfico 7.1** – Evolução da superfície específica (Blaine) em função do tempo de moagem e após o peneiramento na peneira nº 270.



Nos testes que se seguiram, optou-se por não efetuar o peneiramento posterior na peneira nº 270, a fim de preservar a integridade da amostra, evitando-se a perda dos minerais de maior dureza, os quais, possivelmente, ficariam retidos, alterando a composição geoquímica da amostra. Dessa forma, foram estabelecidos novos tempos de moagem, conforme mostra o gráfico 7.2.

**Gráfico 7.2** – Evolução da superfície específica do material pulverulento de basalto sem a aplicação da peneira nº 270 após a moagem.



Percebe-se claramente que a superfície específica não evoluiu tão acentuadamente e, mesmo com um ciclo de moagem de 22 minutos, não se atingiu a superfície específica desejada (1000 m<sup>2</sup> / kg).

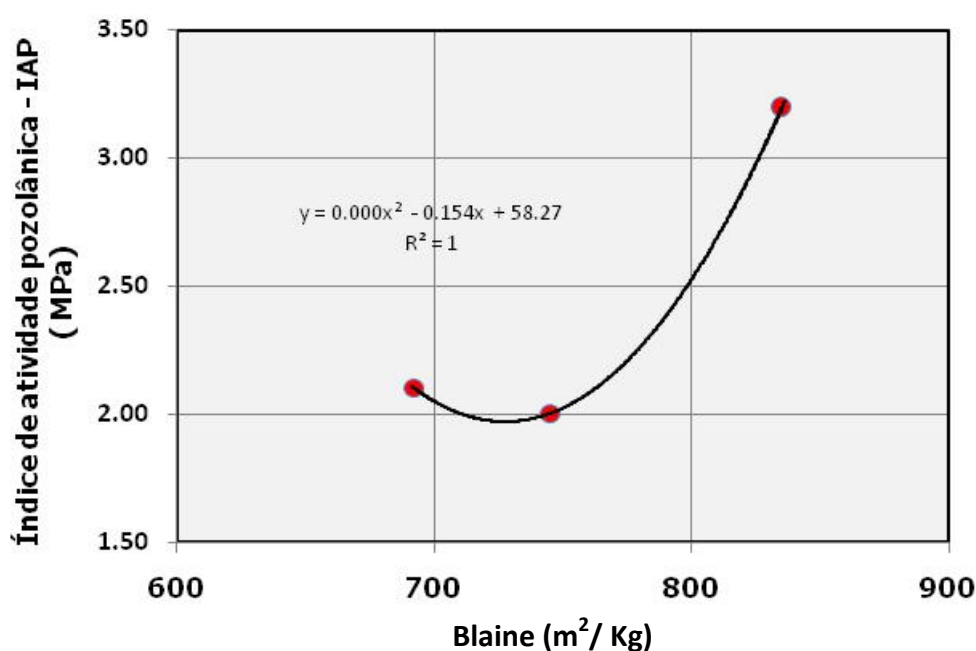
A atividade pozolânica do pó resultante da moagem foi avaliada através do ensaio de reatividade com a cal (IAP). O gráfico 7.3 registra o resultado destes primeiros ensaios.

Como se observa, o resultado do IAP ficou abaixo do necessário (6 MPa), e com isso, nova seqüência de moagens foi iniciada, visando aumentar a superfície específica.

A nova seqüência de moagens foi desenvolvida, com ciclos de 30 a 55 minutos. À medida que se aumentava o tempo de moagem, era perceptível a perda de eficiência

do processo, não somente por não se conseguir aumentar a superfície específica do pó, mas também pela grande quantidade de material, que começou a aderir às paredes da panela e pelo aquecimento do equipamento.

**Gráfico 7.3** – Evolução do Índice de atividade pozolânica (IAP) em função do aumento da superfície específica (Blaine).



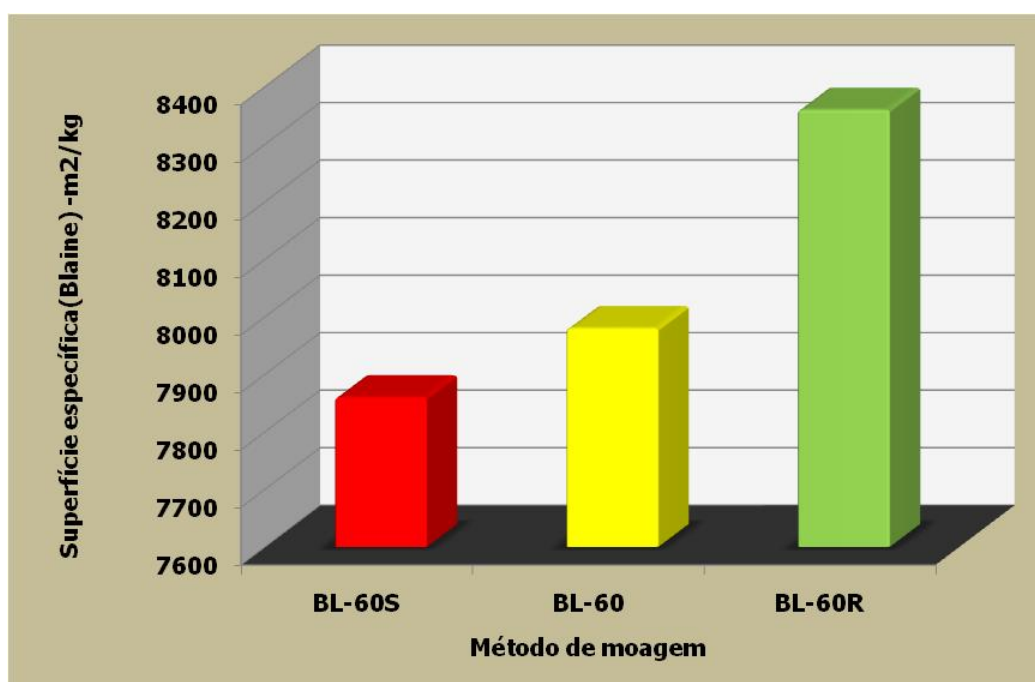
Com o intuito de diminuir a formação de grumos, e assim, tornar possível o aumento do tempo de moagem, uma nova tentativa foi feita para o tempo de 60 minutos. Foram realizados 3 ciclos de moagem, com padrões distintos, conforme tabela 7.1:

**Tabela 7.1** – Variações dos ciclos de 60 min utilizadas para avaliar a possibilidade de redução da formação de aglomerações

Ciclo	Descrição
BL- 60S	Ciclo de 60 minutos sem intervalos (referência);
BL – 60R	Ciclo de 40 min de moagem, descarte do material incrustado, descanso da amostra restante por 12 hs e novo ciclo de 20 minutos;
BL- 60	Ciclo de 40 min de moagem seguido de descanso de 12 hs e novo ciclo de 20 minutos

O gráfico 7.4 mostra que não se auferiu ganho significativo em termos de aumento de superfície específica com estes novos procedimentos. Embora a remoção do material incrustado tenha provocado um efeito positivo sobre o aumento da superfície específica, levou a uma perda de 70% na massa do material processado.

**Gráfico 7.4** – Variação da superfície específica com 60 min de processamento em 3 condições distintas.

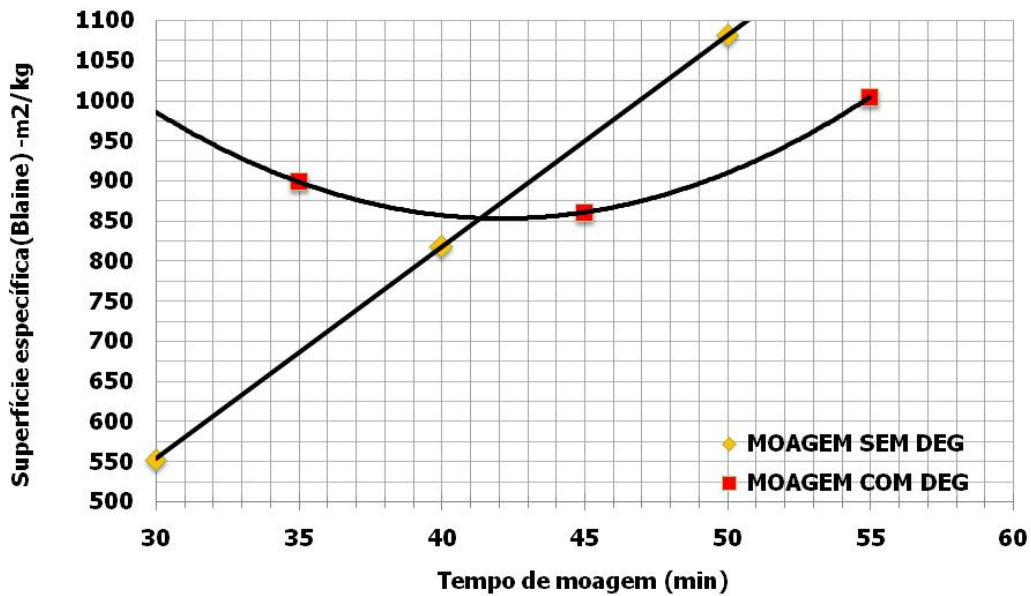


Um novo experimento foi iniciado utilizando-se como auxiliar de moagem o dietileno glicol (DEG). Embora tenha melhorado a eficiência do processo para os tempos entre 30 e 45 minutos, não se conseguiu avançar além da superfície específica obtida com 50 minutos de moagem sem a sua utilização.

O Gráfico 7.5 compara o desempenho das moagens com e sem utilização de dietileno glicol.

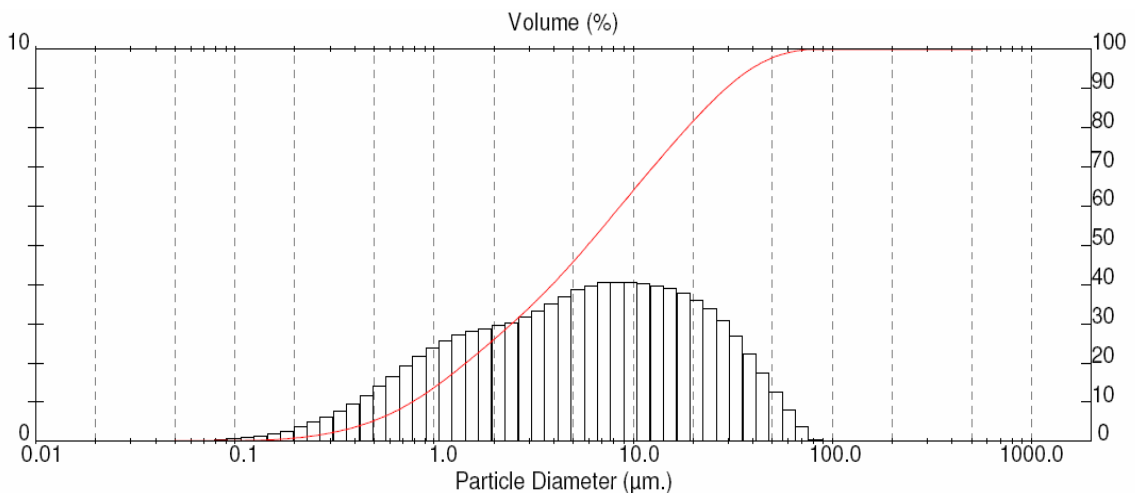
Uma vez que não se obteve um resultado satisfatório suspeitou-se da limitação do tipo de moinho em reduzir suficientemente o diâmetro das partículas para obter um ganho considerável em termos de superfície específica.

**Gráfico 7.5** – Comparação da eficiência de moagem do material pulverulento de basalto com e sem utilização de dietileno glicol

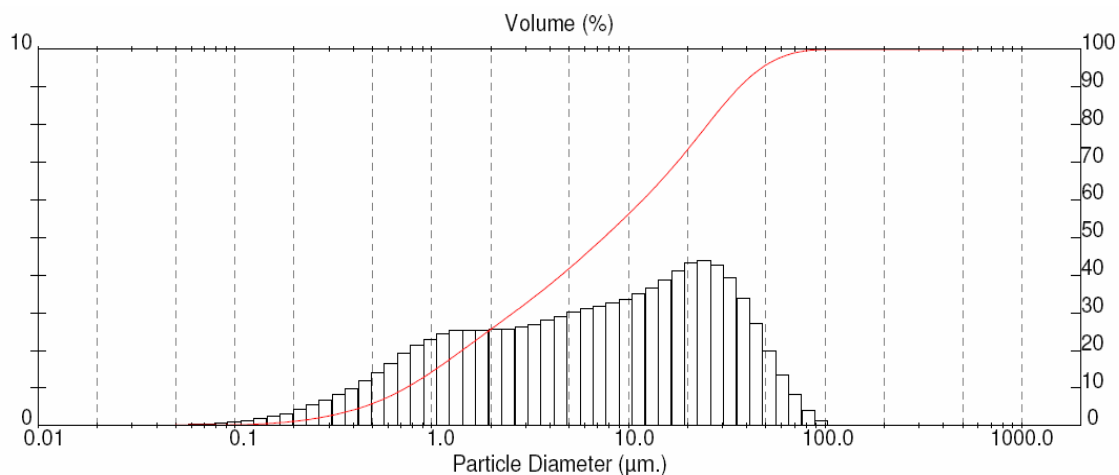


Propôs-se, dessa forma, comparar a eficiência do moinho em utilização com outro equipamento semelhante, porém de outro fabricante, disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais (LCT) da Universidade de São Paulo (USP). A comparação se deu através da análise granulométrica a laser de uma amostra processada por 35 min no equipamento disponível no IPT contra uma amostra processada por 3 min no equipamento do LCT. Os Gráficos 7.6 e 7.7 e a tabela 7.2 estabelecem esta comparação.

**Gráfico 7.6** – Curva de distribuição granulométrica do material pulverulento de basalto submetido a moagem por 2 minutos no moinho pulverizador vibratório de anéis disponível no LCT.



**Gráfico 7.7** - Curva de distribuição granulométrica do material pulverulento de basalto submetido a moagem por 35 minutos no moinho pulverizador vibratório de anéis no IPT.



**Tabela 7.2** - Comparação da distribuição granulométrica resultante do processamento do material pulverulento de basalto em moinhos vibratórios de anéis em tempos distintos.

AMOSTRA (Origem)	Superfície Específica	D(v; 0,1)	D(v; 0,5)	D(v; 0,9)	D(4; 3)	D(3; 2)
	m <sup>2</sup> / kg	µm	µm	µm	µm	µm
BL- 35(IPT)	1179	0,74	7,51	36,75	14,00	1,93
BL - 2(LCT)	1143	0,78	5,90	29,16	11,00	1,98

Obs: D(v; 0,1)->Diâmetro no qual 10% das partículas passam; D(v; 0,5) ->Diâmetro no qual 50% das partículas passam; D(v; 0,9)->Diâmetro no qual 90% das partículas passam; D(4; 3)->média da distribuição das partículas medida pelo seu volume; D(3; 2)->média da distribuição das partículas medida pela sua superfície. Ambas as amostras foram moídas com auxílio do dietilenoglicol.

A partir destes resultados, ficou claro que o moinho vibratório de anéis atinge o seu desempenho ótimo com pouco tempo de processamento, o que faz com que um ciclo prolongado de moagem acrescente muito pouco, em termos de eficiência no aumento da superfície específica.

Além disso, o tempo de processamento excedente acarreta a formação de grumos, quem tem um efeito contrário ao da moagem. Isto se dá, não somente em função de que o material torna-se muito fino e de fácil compactação, mas também pelo surgimento de cargas eletrostáticas que potencializam a aglomeração das partículas.

Estes resultados levaram a encerrar as tentativas de moagem utilizando o moinho vibratório de anéis e a buscar uma nova tecnologia que permitisse o aumento da superfície específica e também maior velocidade de processamento do material.

A nova tecnologia a que se teve acesso, foi a de moagem num equipamento de jatos opostos com leito fluidizado, que é utilizada para moagem ultrafina a seco, sendo que o principal esforço predominante na cominuição é o de choque entre as partículas. Estes moinhos possuem capacidade de moagem que variam, em geral, de 2 kg/h a 6000 kg/h e são adequados para o processamento de materiais abrasivos e resistentes à fragmentação, como para produzir partículas com diâmetro médio da ordem de 2  $\mu$  a 3 $\mu$ . (WELLENKAMP, 1999).

Muito embora este tipo de moinho tenha elevada capacidade de cominuição, o tamanho das partículas ficou ao redor de 4  $\mu$  a 5  $\mu$ . Outro fator adverso, conforme já relatado no item 5.2.2.2, foi a expressiva redução do volume disponível de amostra. Cerca de 40 % do volume processado foi coletado como resíduo com dimensão acima do especificado. A justificativa para o ocorrido encontra-se na elevada dureza do pó, que é agravada pela já reduzida dimensão das partículas, que impôs ainda mais dificuldades para a quebra do material.

## 7.2 ATIVIDADE POZOLÂNICA DO MATERIAL PULVERULENTO DE BASALTO ATIVADO MECANICAMENTE

**F**oram empregados, seqüencialmente, dois métodos para avaliar a atividade pozolânica, sendo estes o Índice de Atividade Pozolânica com a Cal (IAP) e o Método de Chapelle Modificado. Este procedimento foi necessário porque a obtenção do pó ultrafino de basalto foi realizada em duas etapas.

O IAP foi inicialmente empregado para avaliar a amostra do pó de BASALTO BL obtida pelo processamento no moinho vibratório de anéis e o método de Chapelle na avaliação do pó ultrafino obtido do processamento das amostras de BASALTO BL e BASALTO BA no moinho de jatos opostos, bem como da mistura de ambas.

O IAP é uma medida indireta e reflete o crescimento da resistência mecânica com o tempo. É um método de fácil execução e de baixo custo. Ele consiste na mistura, em proporções volumétricas definidas, de cal, areia normal e pozolana. O método de Chappelle foi introduzido visando reduzir o consumo da amostra de pó ultrafino disponível.

Com a utilização do moinho de jatos opostos, na segunda etapa, obtiveram-se superfícies da ordem de 1140m<sup>2</sup>/Kg. A obtenção de superfícies específicas mais elevadas foi dificultada pela dureza do material pulverulento, que é da ordem de 6,0 a 6,5 na escala Mohs.

A superfície específica do pó mitigador é apontada na literatura como um dos fatores mais influentes na redução da expansão. Este é o caso de materiais como o metacaulin e a sílica ativa, cujas superfícies específicas situam-se acima de 2000 m<sup>2</sup>/Kg sendo elevada a sua eficiência.

A literatura fornece relatos de pós reativos (RAP) ensaiados quanto à mitigação da RAS dotados de superfícies específica de 100 a 1050 m<sup>2</sup>/Kg, com a eficiência do pó crescendo proporcionalmente.

As tabelas 6.2.1 e 6.2.2 registram, respectivamente, os resultados da evolução da atividade pozolânica do material pulverulento de basalto processado no moinho vibratório de anéis e no moinho de jatos opostos, em função do aumento da superfície específica, através de métodos distintos.

Tanto o resultado do IAP, quanto o do Chappelle, tabelas 6.2.1 e 6.2.2, mostram que a atividade pozolânica do material pulverulento do basalto em estudo não evoluiu a ponto de atingir os níveis mínimos preconizados nos dois testes (6 MPa e 330 mg CaO/g de material, respectivamente), mesmo submetido à uma elevação considerável de sua superfície específica.

Isto posto, os resultados indicam que o pó ultrafino de basalto não pode ser considerado pozolânico nos moldes propostos pela NBR 5751 (IAP) e ABNT/CB-18 NBR 1595:2010(Chappelle Modificado). Sua ação mitigadora deve ser creditada a outros fatores associados que serão discutidos em tópico posterior.

### 7.3 MITIGAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA PELO USO DE PÓ ULTRAFINO E BASALTO

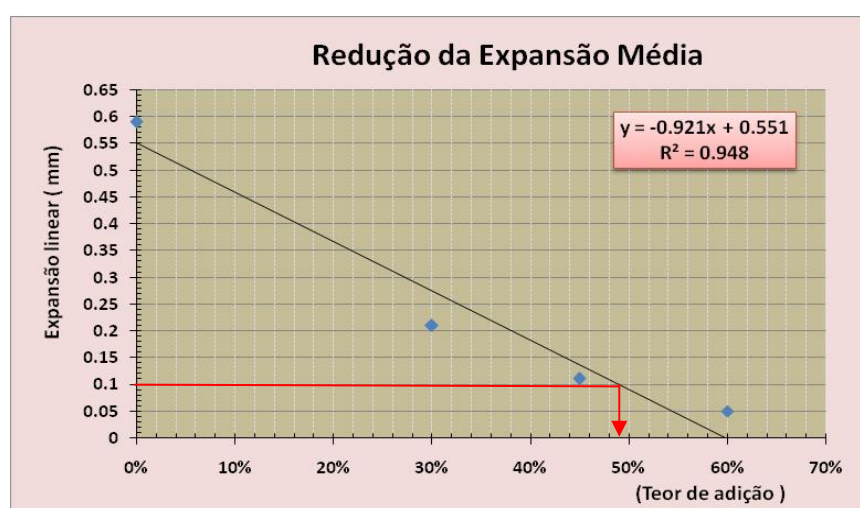
**A** fim de verificar o potencial do pó ultrafino de basalto como agente mitigador da reação álcali-sílica, foram confeccionados três cimentos experimentais com teores crescentes de substituição parcial do CPV ARI pelo referido pó e estes combinados com o agregado BASALTO BA. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a ABNT NBR 15577-5: 2008

Como estabelece a ABNT NBR 15577-1: 2008, a comprovação da mitigação da reação é obtida quando o resultado do ensaio acelerado em barras de argamassa for menor que 0,10% de expansão aos 16 dias.

O Gráfico 6.3.1 mostra que as barras de argamassa contendo adições de 30%, 45% e 60% de pó ultrafino de basalto apresentaram expansões decrescentes de 0,21%, 0,11% e 0,05% respectivamente.

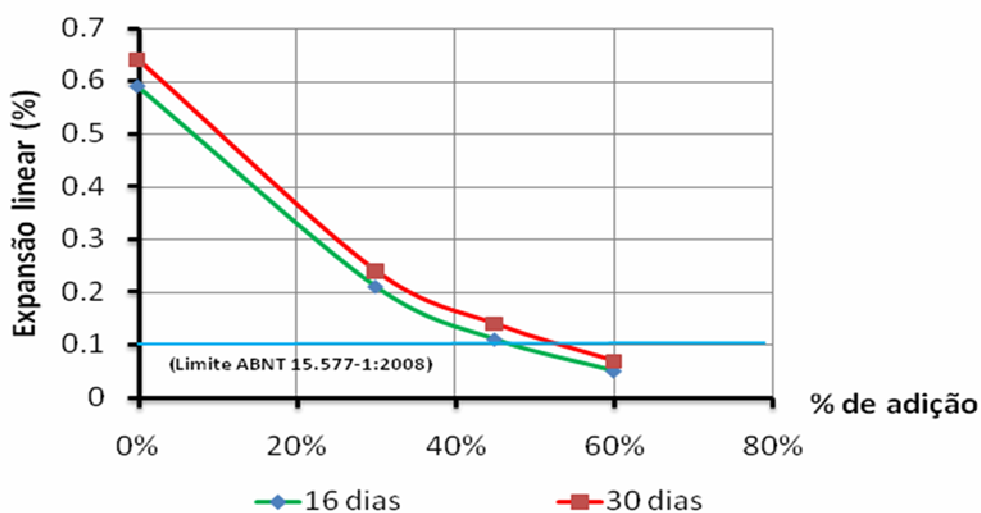
A análise de regressão destes dados sugere que o teor de 49% de adição seria suficiente para atender o limite de 0,10% de expansão máxima (Gráfico 7.8).

**Gráfico 7.8** - Análise de regressão para determinação do teor mínimo de adição de pó ultrafino a fim de atender o limite de 0,10% de expansão.



O Gráfico 7.9 mostra a evolução das expansões das barras de argamassa para o 16º e 30º dias após a moldagem em função do teor de adição.

**Gráfico 7.9** - Evolução da variação dimensional das barras de argamassa com o incremento do teor de pó ultrafino de basalto.



É perceptível na análise da figura 7.9 que as curvas de redução da expansão apresentam uma mesma envoltória, mostrando-se praticamente paralelas, não ocorrendo a aceleração da redução da expansão com o tempo, como seria esperado de um material pozolânico. Este comportamento é decorrente, possivelmente, da baixa atividade pozolânica identificada nas amostras de pó micronizado.

Como avaliação adicional pode-se calcular a redução da expansão média devido ao uso de materiais cimentícios mitigadores na idade de dezesseis dias. A redução na expansão é expressa em números inteiros e calculada segundo a expressão:

$$R = 100(E4 - E5) / E4, \text{ onde:}$$

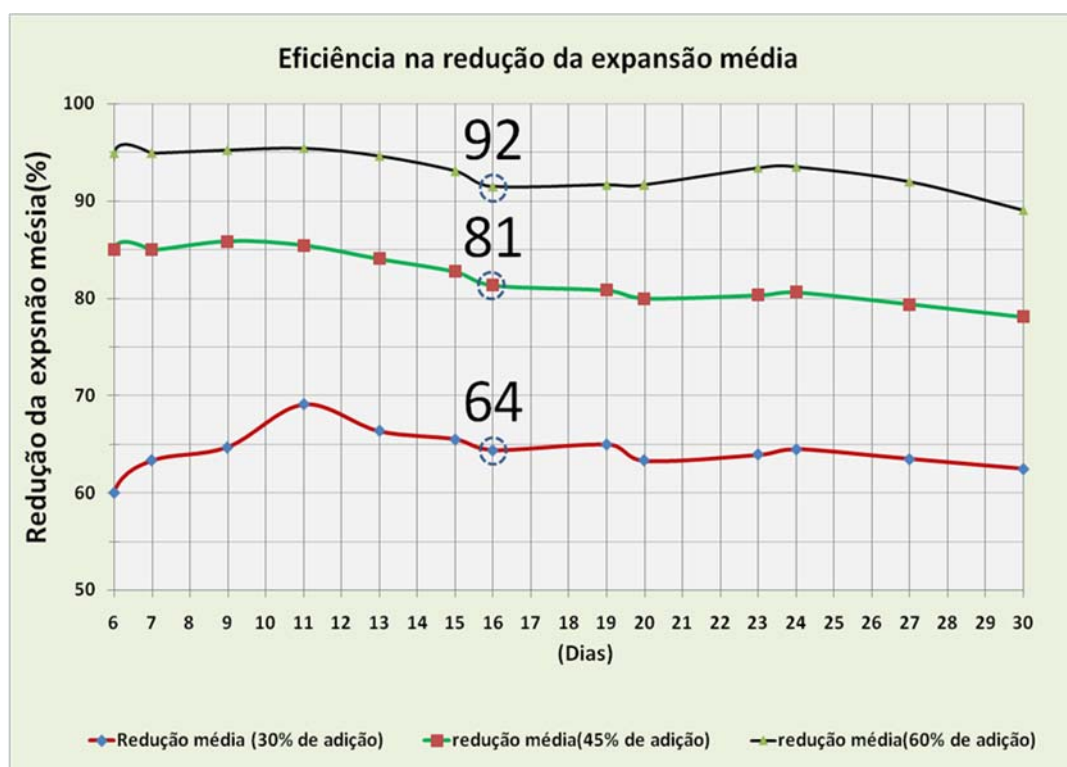
R é a redução da expansão, expressa em porcentagem (%);

E4 é a expansão média das barras, expressa em porcentagem (%) de acordo com o método da ABNT NBR 15577-4;

E5 é a expansão média das barras, expressa em porcentagem (%), de acordo com a ABNT NBR 15577-5.

O resultado desta análise indica uma eficiência na redução da expansão de 64%, 81% e 92% para os teores de adição de 30%, 45% e 60%, respectivamente. Este resultado está expresso no gráfico 7.10.

**Gráfico 7.10** - Verificação da eficiência da adição de pó ultrafino de basalto em diversos teores na redução da expansão em barras de argamassa.



Os resultados indicam que, a despeito da baixa atividade pozolânica demonstrada nos ensaios de IAP e Chapelle, o pó ultrafino de basalto foi eficiente em mitigar a reação álcali-sílica.

Esta constatação leva à necessidade de considerar a ocorrência ou associação de outros fenômenos à redução da expansão.

#### 7.4 PROPOSIÇÃO DE MECANISMOS ENVOLVIDOS NA AÇÃO MITIGADORA DO PÓ ULTRAFINO DE BASALTO SOBRE A REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA.

**E**ste tópico tem o objetivo de sugerir, a partir dos dados de literatura associados aos resultados experimentais do ensaio acelerado de barras de argamassa, mecanismos que estejam envolvidos na mitigação da RAS resultante da substituição parcial do CPV ARI pelo pó ultrafino de basalto.

Dado que o pó ultrafino de basalto apresenta atividade pozolânica muito baixa, como demonstrado, outros fatores devem estar operando em conjunto para produzir o efeito mitigador. Desse modo, serão discutidos seis mecanismos que podem estar associados ao fenômeno observado.

#### 7.4.1 Diluição do Teor de Álcalis

O efeito mitigador relacionado à diluição do teor de álcalis pelo uso de adições, em função da redução do consumo de cimento, não se verifica no contexto do ensaio acelerado de barras estabelecido na NBR 15.577, uma vez que a solução aquosa com concentração 1N de hidróxido de sódio (NaOH) produz um estoque abundante de cátions e hidroxilas, não ocorrendo a redução do teor de álcalis disponíveis. Em situações de estruturas operando em condições reais, esta possibilidade torna-se uma explicação bastante plausível.

#### 7.4.2 Redução da Permeabilidade

A elevada superfície específica do pó ultrafino, cuja adição resulta em um cimento bastante fino, com superfície específica (blaine) de  $770 \text{ m}^2/\text{Kg}$ , pode levar ao refinamento dos poros da argamassa, reduzindo sua permeabilidade. Novamente, em uma situação real, a condição de baixa permeabilidade do concreto é bastante desejável, uma vez que minimiza um dos fatores indispensáveis à ocorrência da reação álcali-sílica, que é a infiltração de água para o interior da peça.

A identificação da presença de esmectitas na composição mineral do basalto sugere a participação de outro fenômeno na redução da permeabilidade, tal qual ocorre em camadas de solo em que há abundância de esmectitas. O inchamento cristalino destes argilominerais pode colaborar para o refinamento dos poros existentes, com efeito marcante sobre a redução da permeabilidade.

### 7.4.3 Aumento da Fixação de Álcalis no C-S-H

Não se verificou aumento significativo da atividade pozolância do pó ultrafino de basalto em função do aumento da superfície específica. Isto pode ser consequência do baixo grau de destruição dos cristais de sílica produzido pela micronização das amostras de basalto estudadas.

A literatura, ao descrever a ação de pós reativos, indica que quanto maior a capacidade de liberação de sílica, maior a eficiência do pó. Isto se deve ao fato de que ocorre uma minoração da relação entre CaO e SiO<sub>2</sub> no ligante, que por sua vez se reflete na redução da relação Ca/Si no C-S-H formado, elevando a sua capacidade de acomodação de cátions Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> em sua estrutura. Esta acomodação reduz o ataque de álcalis aos grupos SiO<sup>-</sup> formados na superfície dos agregados, prevenindo a produção do gel de silicato alcalino expansivo.

Dessa forma, pelo menos em relação a esta etapa da reação, o pó reativo, aparentemente, comporta-se como uma pozolana convencional.

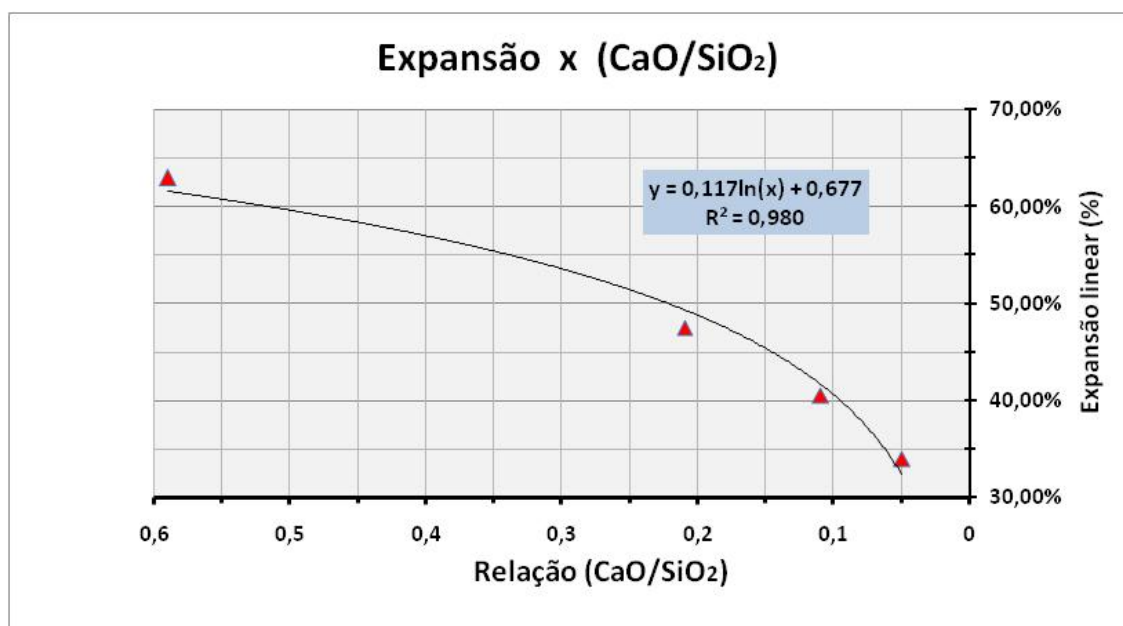
Como o óxido de cálcio, neste caso, é proveniente apenas do cimento, é possível a partir da análise química do cimento original (CPV ARI) e dos cimentos experimentais, obter a relação CaO/SiO<sub>2</sub> diretamente ou por interpolação linear dos valores e observar a influência da adição do pó ultrafino. A tabela 7.3 e o gráfico 7.11 exibem esta relação.

**Tabela 7.3** – Associação da relação entre o teor de óxido de cálcio e sílica e a redução da expansão devida à reação álcali-sílica

ÓXIDOS (%)	TEOR DE ADIÇÃO DO PÓ ULTRAFINO DE BASALTO				
	0%	30%	45%	49%	60%
CaO	62,51	45,35	36,76	33,33	29,76
SiO <sub>2</sub>	20,03	30,25	35,35	37,40	39,52
CaO/SiO <sub>2</sub>	3,12	1,50	1,04	0,89	0,75
Expansão	0,59	0,21	0,11	0,10	0,05

Fica evidente que, à medida que o teor de adição cresce, a relação  $\text{CaO/SiO}_2$  diminui. A relação decai de um patamar de 3,12, no cimento sem adição, até 0,75 no caso do cimento experimental com 60% de adição.

**Gráfico 7.11** - Associação da minimização da relação ( $\text{CaO/SiO}_2$ ) à redução da expansão devido à reação álcali-sílica em barras de argamassa.

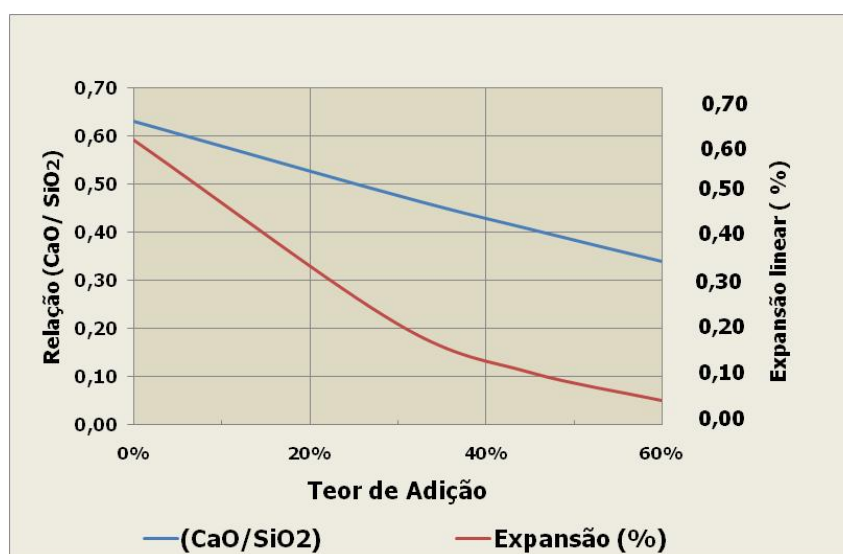


Outra constatação importante, oriunda da análise petrográfica e mineralógica das amostras de basalto e do pó micronizado, é a identificação de argilominerais do grupo das esmectitas, embora não seja possível especificar qual argilomineral pertencente a este grupo está presente.

As esmectitas são reconhecidas pela sua ampla capacidade de adsorção de moléculas de água no espaço interplanar e a sua conseqüente expansão. O que chama à atenção é que a adição crescente de pó ultrafino de basalto poderia ter implicado na ocorrência de maiores expansões em função de maiores teores de esmectitas, porém isto não ocorreu.

Uma outra maneira de mostrar a associação da redução das expansões com a redução da relação  $\text{CaO/SiO}_2$  pode ser vista no gráfico 7.12.

**Gráfico 7.12** – Associação da redução das expansões lineares com a minimização da relação (CaO/SiO<sub>2</sub>)

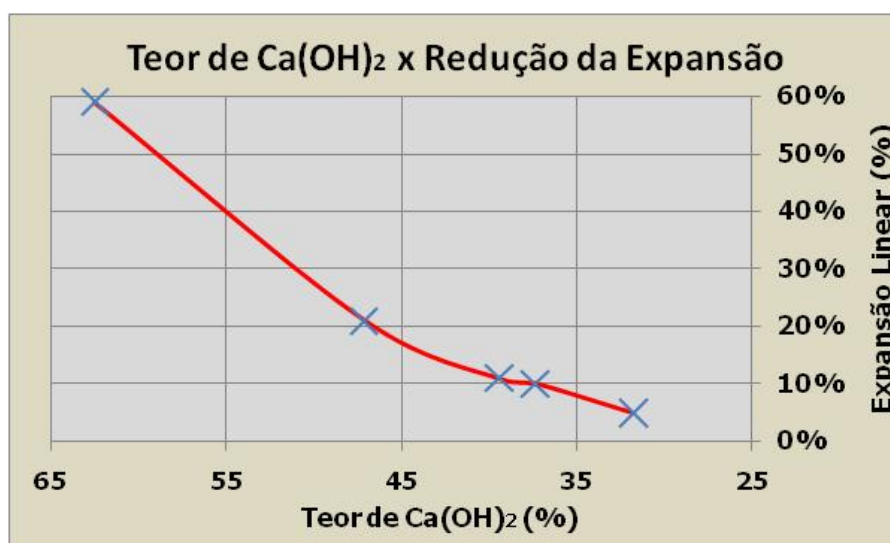


Em relação à análise feita através dos gráficos 7.11 e 7.12 é preciso esclarecer que se trata de uma aproximação, constituindo-se num indicador de tendência e não um resultado absoluto. Esta observação é importante porque, a confirmação da ocorrência deste fenômeno, depende de uma determinação precisa do teor de sílica solúvel para cada nível de adição utilizado. Como pode ser percebido nas tabelas 6.1.1 e 7.3 a análise baseou-se no teor de sílica total, obtida por fluorescência de Raios-X.

#### 7.4.4 Redução do pH

Embora o pó micronizado tenha apresentado baixa atividade pozolânica, pode-se inferir que esta tenha contribuído para a redução do pH, consumindo Ca(OH)<sub>2</sub>. A redução do pH da solução dos poros é desfavorável à ocorrência da RAS. Utilizando o mesmo método de cálculo empregado para estimar a relação CaO/SiO<sub>2</sub>, pode-se estabelecer a seguinte relação entre a redução dos níveis de Ca(OH)<sub>2</sub> e a redução da expansão linear (gráfico 7.13).

**Gráfico 7.13** – Associação da redução do teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  com a redução da expansão linear em barras de argamassa em função do teor de adição de pó ultrafino de basalto.



#### 7.4.5 Redução do Teor de Álcalis Disponíveis Pela Ação Fixadora das Esmeclitas

Dentre os argilominerais do grupo das esmeclitas o mais abundantemente encontrado na natureza é a montmorilonita, que é muito fina, de elevada carga superficial, elevada capacidade de troca catiônica, cerca de 60 a 170 meq/g, e muito expansiva na presença de água.

Ao mesmo tempo, os cátions  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , quando adicionados à soluções aquosas contendo esmeclitas, são capazes de controlar a sua expansão osmótica. Esta inibição ocorre porque os cátions  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  substituem o cátion trocável ligado à estrutura da argila e impedem o acesso de grandes quantidades de moléculas de água ao espaço interplanar. Considerando a condição severa do ensaio de barras de argamassa se processa, ou seja, elevada temperatura ( $80^\circ\text{C}$ ), a CTC das esmeclitas é favorecida.

Em função da quantidade de pó ultrafino adicionado aos cimentos experimentais e da avaliação do teor de argilominerais presentes nas amostras de basalto, pode-se calcular, de modo aproximado, o teor de esmeclitas existente e verificar a sua correlação com a redução da expansão linear das barras.

A composição modal do BASALTO BA indica a presença de cerca de 5% de argilominerais castanhos, identificados genericamente como esmectitas, e no caso do BASALTO BL cerca de 5% a 10% de argilominerais castanhos e verdes.

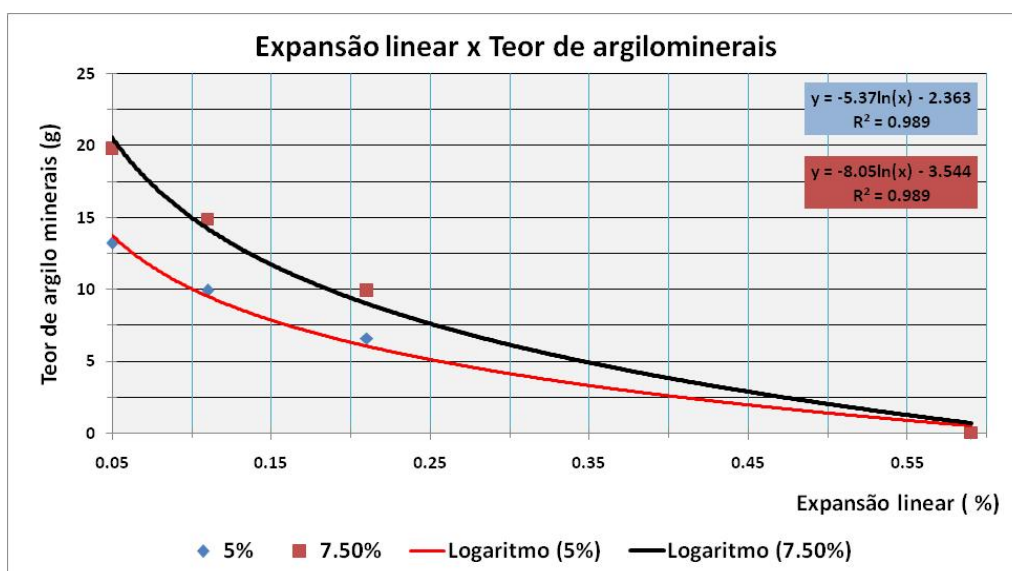
Levando-se em consideração que cada tipo de basalto foi adicionado em proporções iguais (50%/50%), o teor de esmectitas presente no pó ultrafino pode ser estimado entre 5,0% a 7,5%. A tabela 7.4 explicita o teor estimado de esmectitas presentes nos cimentos experimentais e o gráfico 7.14 traça a correlação com a expansão linear observada.

O gráfico sugere uma relação inversa entre o teor de esmectitas presentes e a evolução das expansões.

**Tabela 7.4** – Estimativa do teor de esmectitas presentes nos cimentos experimentais em função do teor de adição

TEOR DE ADIÇÃO (%)	EXPANSÃO LINEAR (%)	ESTIMATIVA DO TEOR DE ARGILOMINERAIS	
		5.0% (g)	7.50% (g)
0%	0.59	0.00	0.00
30%	0.21	6.60	9.90
45%	0.11	9.90	14.85
60%	0.05	13.20	19.80

**Gráfico 7.14** – Relação inversa entre teor de esmectitas presentes na adição e expansão linear em barras de argamassa



Esta evidência parece sugerir, a partir da análise do gráfico 7.14 e da tabela 7.4, lembrando que o comportamento esperado das esmectitas em presença da água seria potencializar a expansão das barras, que a expansão das esmectitas não ocorre porque há abundância de cátions  $K^+$  e  $Na^+$  na solução dos poros, os quais atuam como inibidores da expansão osmótica.

As esmectitas possuem elevada carga superficial, e por isso seriam capazes de remover cátions alcalinos da solução, reduzindo a sua disponibilidade. Isto se refletiria, não somente na redução do pH da solução nos poros, mas também levando a uma redução na formação do gel expansivo na superfície dos agregados.

Esta é uma hipótese importante para ser considerada, especialmente em situações reais de operação, em que os teores de sódio e potássio são limitados e se observaria com mais intensidade a fixação dos álcalis e a redução na formação de gel. No contexto do ensaio acelerado de barras, a importância deste fator diz respeito, principalmente, à inibição do inchamento osmótico das esmectitas, uma vez que a disponibilidade de álcalis é muito grande.

Muito embora a expansão osmótica seja inibida pela elevada concentração de sódio e potássio, a expansão cristalina pode ocorrer, pois é função apenas da hidratação dos cátions presentes no espaço interplanar. Como assinalado anteriormente, é possível supor que isto também venha a colaborar com a redução da permeabilidade da argamassa e dificultar o acesso de água e álcalis.

#### 7.4.6 Redução da Relação $CaO/SiO_2$ Pela Ação Sinérgica Entre a Remoção de $Ca^{2+}$ e Liberação de Sílica Pelas Esmectitas

Outra hipótese plausível para explicar a redução da expansão devido à RAS, está igualmente ligada à CTC das esmectitas. Os cátions bivalentes, como é o caso do  $Ca^{2+}$ , possuem uma grande facilidade de substituir, ou deslocar, cátions monovalentes como o  $Na^+$ . Se vier a ocorrer uma grande substituição de sódio por cálcio, a relação  $CaO/SiO_2$  também será minorada. Concomitantemente, a desintegração da montmorilonita, pelo processo de micronização, proporciona

liberação de novas moléculas de sílica. Estes dois fatores, atuando sinergicamente, irão somar seus efeitos para minimizar a RAS.

## 7.5 QUANTO À UTILIZAÇÃO DO PÓ ULTRAFINO DE BASALTO NA PRODUÇÃO DE CIMENTO MITIGADOR DA RAS

Este item remete ao objetivo geral desta pesquisa, que se propôs a avaliar o potencial do pó ultrafino de basalto, como adição, para o desenvolvimento de um cimento mitigador da RAS. Esta avaliação levou em consideração os seguintes itens em relação ao pó ultrafino:

- Desenvolvimento de atividade pozolânica, medida através do IAP e do ensaio de Chapelle modificado;
- Redução da expansão linear, aferida pelo ensaio acelerado de barras de argamassa e
- As características físicas, químicas e mecânicas de um cimento experimental com 49% de adição.

Conforme relatado no item 6.3, o pó ultrafino de basalto, quando adicionado em substituição parcial (60%) do CPV ARI, foi eficaz em mitigar a RAS, reduzindo as expansões a valores abaixo do preconizado pela norma NBR 15.577-1, aos dezesseis dias de ensaio. Os demais teores utilizados (30% e 45%) promoveram reduções nas expansões, porém, estas ficaram acima dos limites de norma. Uma vez que o pó ultrafino não desenvolveu atividade pozolânica expressiva, considerou-se que outros mecanismos, descritos no tópico anterior, devem ter colaborado para produzir este efeito.

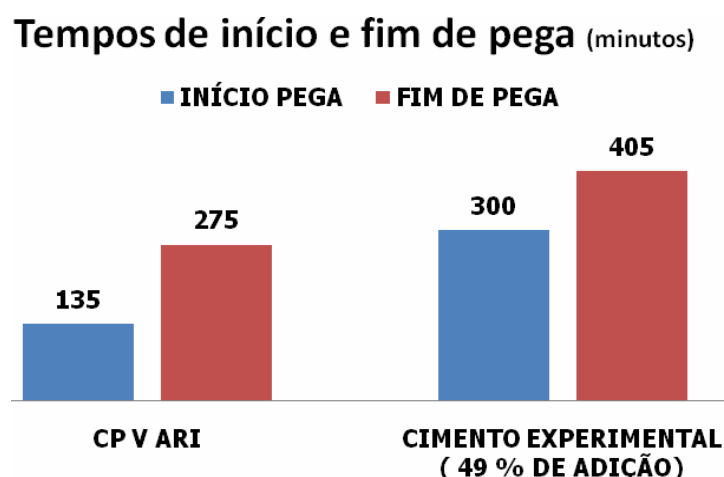
O item 7.2 registra que o pó ultrafino de basalto utilizado neste experimento não pode ser considerado um material pozolânico, em função dos resultados insuficientes demonstrados na avaliação pelo IAP e pelo método de Chapelle, muito embora tenha sido ativado mecanicamente através da elevação de sua superfície específica. Dessa forma, a sua utilização como adição na produção de cimento fica comprometida. Em

função do exposto a seguir, novos estudos devem ser feitos na tentativa de viabilizar o seu aproveitamento para produção de cimento.

Não está dentro do escopo deste trabalho avaliar o impacto da adição do pó ultrafino sobre a cinética de hidratação do clínquer do CPV ARI, utilizado como base, mas alguns dos resultados de ensaio evidenciam a sua influência sobre a reação.

A primeira evidência da influência do pó ultrafino está na análise dos tempos de início e fim de pega. O CPV ARI utilizado apresentou tempos de início e fim de pega de, respectivamente, 135 e 275 minutos. Na análise do cimento experimental estes tempos passaram a 300 e 405 minutos. Embora estejam perfeitamente dentro dos limites traçados pela NBR 5736 para cimentos pozolânicos, fica evidente o retardamento das reações de hidratação (gráfico 7.15), o que limita o seu campo de aplicação.

**Gráfico 7.15** – Comparação dos tempos de início e fim de pega entre o CPV ARI e o cimento experimental com 49% de adição de pó ultrafino de basalto



A segunda evidência vem da análise das resistências mecânicas. A evolução das resistências do cimento experimental foi medida ao décimo quarto dia, vigésimo oitavo e quinquagésimo sexto.

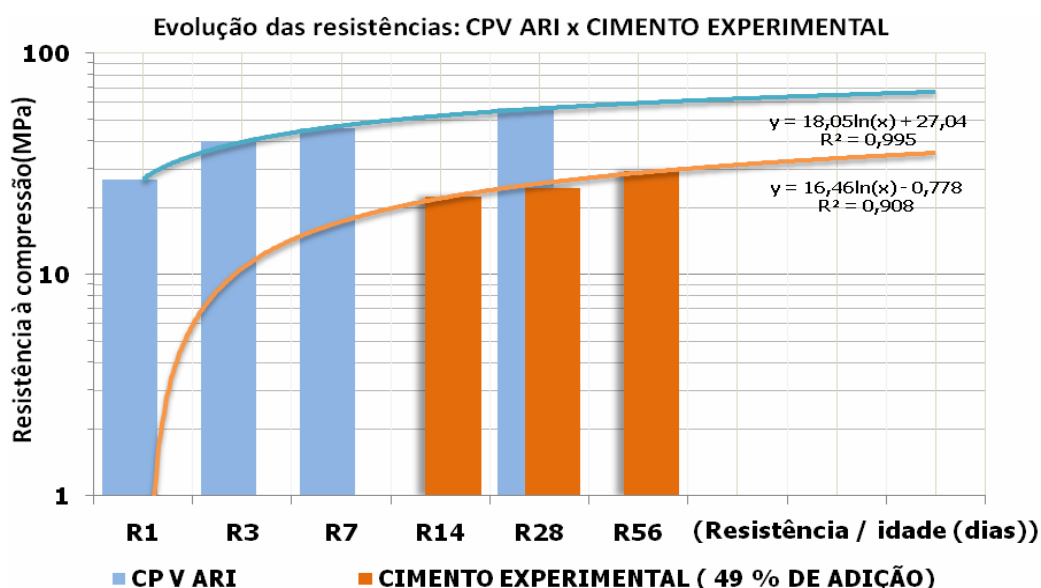
Conforme demonstrado na tabela 6.1.2 e no gráfico 7.16 as resistências evoluíram muito pouco a partir do décimo quarto dia, ficando abaixo do valor mínimo especificado para a resistência à compressão aos 28 dias de idade de um cimento CP IV classe 32, mas muito próxima de um cimento CP IV classe 25.

Dentre as exigências estabelecidas na NBR 5736, que fixa as características do cimento portland pozolânico, as únicas exigências não atendidas dizem respeito ao teor de CO<sub>2</sub>, avaliado em 3,7% (a norma limita a 3,0%) e a resistência aos 28 dias que deveria ser, no mínimo, 25 MPa para o cimento CPIV-25, conforme já mencionado. Contudo o cimento pozolânico classe 25 não é produzido comercialmente.

A pequena evolução das resistências pode ser explicada a partir da baixa atividade pozolânica demonstrada pelo pó, o que faz com que as resistências não cresçam, mesmo em idades mais tardias (56 dias p.e.).

Soma-se a isto a elevada superfície específica do pó ultrafino que, considerando o teor utilizado (49%), pode comprometer a hidratação dos grãos de clínquer, prejudicando a evolução das resistências.

**Gráfico 7.16** – Comparativo da evolução das resistências entre o cimento CP V ARI e o cimento experimental com 49% de adição de pó ultrafino de basalto.



Estes resultados, em relação às baixas resistências mecânicas, criam uma oportunidade para produção de outros tipos de cimento cuja aplicação requeira menores resistências, como é o caso do cimento para alvenaria.

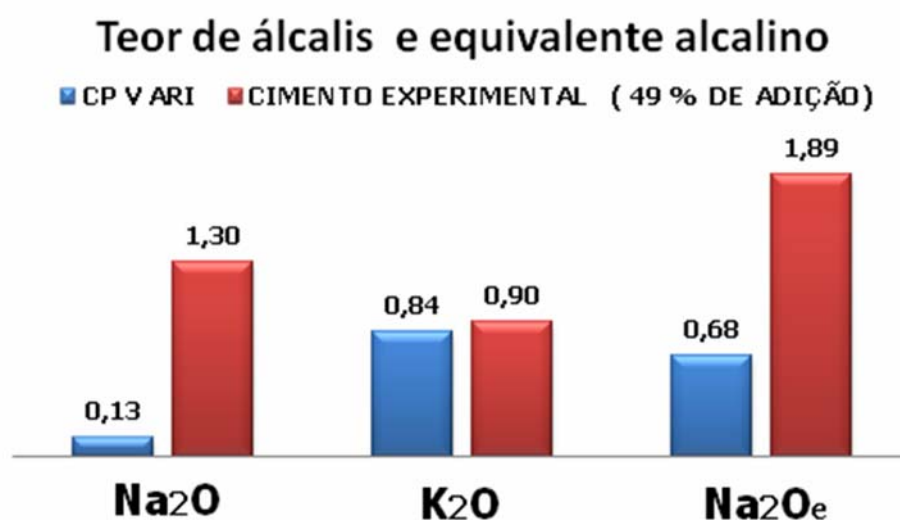
No Brasil, esta aplicação já foi normalizada pelas NBR 10906 e NBR 10907, porém, estas foram canceladas em 2002 e não mais editadas (LIMA, 2009).

O cimento para alvenaria se caracteriza pelo baixo custo e baixa responsabilidade com a resistência mecânica, buscando melhores resultados em relação às propriedades no estado fresco (consistência e retenção de água), importantes para a produção de argamassas de revestimento e de assentamento (TANGO, S.; 2000).

Segundo Lima (2009), este tipo de cimento foi retirado de mercado na década de 90, por mau uso, uma vez que estava sendo empregado indevidamente para a produção de concreto. Contudo, se utilizado corretamente, tem um apelo muito forte advindo da busca por produtos mais sustentáveis.

Outro elemento importante a considerar, diz respeito ao elevado equivalente alcalino do cimento experimental (1,89%). A análise química identificou um elevado teor de óxido de sódio (1,30%) presente, cerca de 10 vezes mais que o encontrado no CPV ARI utilizado nesta pesquisa (0,13%). O teor de óxido de potássio encontrado foi semelhante em ambos os cimentos (gráfico 7.17).

**Gráfico 7.17** – Comparação entre o teor de álcalis e equivalente alcalino presentes no CPV ARI e no cimento experimental.

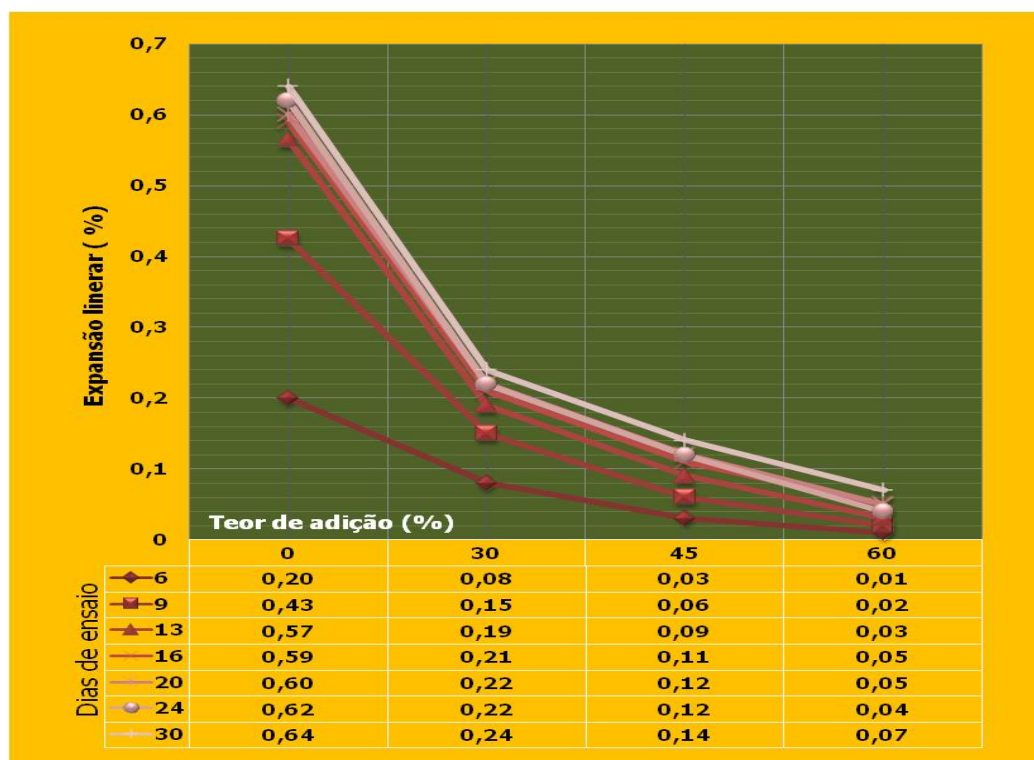


Tanto o basalto BA, quanto o basalto BL apresentam equivalente alcalino de cerca de 3,37%, muito embora apenas 0,03% dos álcalis sejam solúveis. Pode-se supor que o aumento no teor de álcalis identificado seja devido à destruição do arranjo cristalino de minerais como a labradorita e a augita, no processo de micronização, facilitando a liberação do sódio presente em sua estrutura.

Por outro lado, deve-se entender que estes resultados referem-se a um cimento experimental, cujo teor de adição foi de 49% e que apresentou superfície específica de 770 m<sup>2</sup>/Kg.

A análise estatística efetuada, sobre os resultados do ensaio acelerado de barras de argamassa, cujo **p** valor está próximo a zero, sugere que, a partir do décimo sexto dia de ensaio, não existem diferenças estatisticamente significativas entre os níveis de adição utilizados (gráfico 7.18), em relação às expansões medidas.

**Gráfico 7.18-** Relação entre o percentual de adição de pó ultrafino de basalto e a evolução das expansões lineares com o tempo de ensaio.



Dessa forma, pode-se inferir que o cimento experimental produzido com o teor de adição de 30% tem, estatisticamente, a mesma eficácia que o cimento produzido com 60% de adição. Evidentemente, espera-se que teores menores de adição proporcionem tempos de pega menores, resistências mecânicas maiores e equivalentes alcalinos menores.

---

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

**A** crescente utilização de areias de britagem de basalto na indústria da construção civil, em função da escassez da areia natural, tem conduzido ao acúmulo de grandes quantidades de filer nas pedreiras. Este é um passivo ambiental que envolve, não somente o custo para sua disposição adequada, mas também remete às perdas de energia relacionadas a sua geração.

Ao se explorar a possibilidade do aproveitamento deste material, como adição ao cimento portland, tenciona-se prover uma solução ambientalmente adequada para a disposição deste resíduo.

As amostras de basalto estudadas, em função de suas características mineralógicas, estão potencialmente sujeitas à reação álcali-sílica. Verificou-se que o material pulverulento proveniente da sua britagem, quando ativado mecanicamente pela elevação da sua superfície específica, tem o potencial de inibir esta reação.

A mitigação não resulta de atividade pozolânica pura, uma vez que esta se mostra muito baixa. A possibilidade da associação de diversos mecanismos parece sugerir um modelo plausível para justificar a ação mitigadora do pó ultrafino de basalto.

Os elementos que podem estar associados neste mecanismo são: a) diluição do teor de álcalis; b) redução da permeabilidade; c) aumento da fixação de álcalis no C-S-H; d) redução do pH pela fixação da cal livre; e) redução do teor de álcalis disponíveis pela ação fixadora das esmectitas; f) redução da relação  $\text{CaO/SiO}_2$  pela ação sinérgica entre a remoção de  $\text{Ca}^{2+}$  e g) liberação de sílica pelas esmectitas.

A redução do teor de álcalis na solução dos poros, seja pela ação fixadora das esmectitas ou pela sua diluição em função da redução do teor de cimento, é um fator mais relevante para situações de estruturas em operação do que para o ensaio acelerado de barras de argamassa pois, no caso do ensaio com as barras, há um abundante estoque de álcalis na solução utilizada para a cura agressiva. Os demais fatores apontados são relevantes nas duas situações.

Como demonstrado, a introdução do pó ultrafino de basalto no teor de 49% de substituição, gerou um cimento com elevada superfície específica Blaine e com baixas resistências mecânicas. Embora este nível de adição de pó ultrafino ainda permita classificá-lo como cimento pozolânico, isto não se justifica. O teor médio de adição de pozolanas nos cimentos do tipo CP IV produzidos no Brasil, conforme descrito na literatura, está ao redor de 30,5%. Ao mesmo tempo, a análise estatística revelou que a redução na expansão dimensional não é significativa, a partir do décimo sexto dia de ensaio, quando comparados os níveis de adição utilizados na pesquisa. Dessa forma, abre-se um caminho para considerar a possibilidade do aproveitamento do pó ultrafino de basalto, em teores menores, para viabilizar a produção de outros tipos de cimento.

➤ **Recomendações para estudos futuros:**

Se por um lado é desejável que ao final de uma investigação científica sejam auferidos resultados que tragam avanços no entendimento geral do tema estudado, espera-se igualmente, o surgimento de lacunas de conhecimento que façam emergir novas frentes de pesquisa sobre o fenômeno em observação.

Dessa maneira, espera-se contribuir, num futuro próximo, com o estudo e avaliação dos seguintes tópicos:

- Avaliar o efeito da ativação térmica do material pulverulento de basalto no desenvolvimento da sua pozolanicidade e na mitigação da reação álcali-sílica;
- Avaliar o papel das esmectitas na redução das expansões, utilizando outros métodos de ensaio, como por exemplo, o ensaio em auto-clave, buscando esclarecer qual o seu comportamento predominante: se fornecendo álcalis e sílica ou removendo álcalis do sistema.
- Avaliar a ocorrência da reação álcali-sílica e a sua mitigação em testes de longa duração com agregados de origem basáltica e pó ultrafino, uma vez que os testes acelerados têm mostrado resultados ambíguos.
- Avaliar microscopicamente as barras de argamassa utilizadas no experimento visando a identificação de produtos decorrentes da reação álcali-sílica (gel);

- Determinar experimentalmente o teor de CaO e SiO<sub>2</sub> presente nas barras de argamassa e entender a sua relação com a presença de esmectitas e com a redução das expansões.
- Testar a eficácia da adição de menores teores do material pulverulento de basalto micronizado na mitigação da RAS.
- Verificar a eficácia do material pulverulento de basalto micronizado, com superfícies específicas próximas à do cimento, na mitigação da RAS.
- Verificar o efeito da variação da superfície específica do material pulverulento de basalto na CTC, associando esta observação à mitigação ou não da RAS.
- Identificar o tipo de esmectita presente no pó ultrafino e a sua relação com a redução da expansão linear.
- Avaliar o desenvolvimento de cimentos binários ou ternários com a associação de pó ultrafino de basalto a cinzas volantes, escória, cinzas de casca de arroz, vidro pulverizado, etc.
- Avaliar microscopicamente a alteração produzida na estrutura das esmectitas em função do tempo de moagem por jatos opostos.
- Estudar a influência do método de cominuição do material pulverulento de basalto e a sua influência na alteração da concentração geoquímica das espécies presentes;
- Avaliar as ações física e química do pó ultrafino de basalto sobre os estágios de hidratação do cimento Portland.
- Verificar a viabilidade do uso de bentonita na mitigação da reação álcali-sílica.
- Avaliar a influência do teor de alumínio na pozolanicidade dos finos de basalto.
- Estabelecer a relação entre tipo e teor da fase reativa e a quantidade de adição suficiente para mitigar a reação álcali-sílica

---

## 9 REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 221. ACI 221. 1R-98. State-of-the-art: Report on alkali-aggregate reactivity. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, p. 1-31, 1998

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, 1997, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. 1 CD ROM.

ANDRIOLO, F. R. Usos e Abusos do Pó de Pedra em diversos tipos de concreto. In: Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, 2. , 2002 **Anais...**,2002. 1 CD ROM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 2.ed.rev. Atual. São Paulo, 1994. 28p.

BARTORELLI, A. Geologia da bacia do alto Paraná. In: SIMPÓSIO SOBRE GEOTECNIA DO ALTO PARANÁ,1983,São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMS/ABGE, 1983, v.1, p.11-15.

BASILIO, F. B. **Cimento Portland**. 5. ed. São Paulo: ABCP, 1983, 44p (Estudo Técnico 28)

BATIC, O. R.; SOTA, J. D.; MAIZA, P. J. Montmorillonite included in some aggregates: A principal factor of ARS. In: The 9<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALCALI-AGGREGATE IN CONCRETE. **Proceedings ...** Londres, v.1, p. 53-60, 1992.

BATTAGIN, I. L. da S. **ABNT 15.577: 2008 a nova norma brasileira de reação álcali-agregado**. In: III WORKSHOP QUALICERT - ARTEFATOS DE CONCRETO. QUALIDADE, SEGURANÇA E RESULTADOS. 2008. Curitiba.

BATTAGIN, I. L. da S; BATTAGIN, A. F.; NETO C. S. A norma técnica brasileira de reação álcali-agregado faz seu primeiro aniversário. **Revista Concreto**, São Paulo, n. 54, p. 34-47, abril-junho 2009. Disponível em: < [http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas\\_ibracon/rev\\_construcao/rev\\_construcao\\_54.htm](http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/rev_construcao_54.htm)>. Acesso em junho 2009.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. Centro de Tecnologia Mineral. **Minerais aplicados à Tecnologia Ambiental: Minerais Verdes. Dezembro 2008**. Disponível em : < [www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2008-194-00.pdf](http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2008-194-00.pdf) >. Acessado em: 18 agosto 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2008**. Disponível em: < <http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=1165> >. Acesso em: 04 set 2009.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2009**. Disponível em: < [https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4544](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4544) >. Acesso em: 08 out 2010.

BROEKMANS, M. A. T. M. **Structural properties of quartz and their potencial role for ASR. Materials Characterization**. V53 , n.2-4, p. 129-140. Novembro 2004. Disponível em:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TXJ-4DFSWRJ-3/2/b44d5421e89199950a3c7aab5680643a> >. Acesso em: 29 julho 2009.

CAIJUN, S. et al. **Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders**. Cement and Concrete Research. v.35 , n.5, p.987-993. Maio 2005. Disponível em: < doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.015 >. Acesso em: 14 julho 2009.

CARDOSO, J. J. B. **Estudo do inchamento de bentonitas sódicas e avaliação do desempenho de inibidores pela difração de Raios X**. 2005. 116 f. Dissertação Mestrado (Engenharia Nuclear). COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CARLES-GIBERGUES, A. et al. **A Simple way to mitigate alkali-silica reaction**. Materials and Structures. v. 41, n. 1, p. 73-83, jan 2007. Disponível em < <http://www.springerlink.com/content/83717n571138p78h/>>. Acesso em 15 maio 2009.

CASTRO, et al. **Influência do agregado pulverizado na reação álcali-agregado**. 1997. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. 1 CD ROM.

CHAVES, A. P.; CHIERAGATI, A. C. **Estado da Arte em tecnologia mineral no Brasil**. 2002. Disponível em < [http://www.finep.gov.br/fundos\\_setoriais/ct\\_mineral/documentos/ct-mineral06estado\\_da\\_arte.pdf](http://www.finep.gov.br/fundos_setoriais/ct_mineral/documentos/ct-mineral06estado_da_arte.pdf) >. Acesso em: 28 set. 2010.

COLLINS, C. L., et al. Alkali-Silica Reaction: "The Cancer of Concrete". School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology. Disponível em <[Http://people.ce.gatech.edu/~kkurtis/gwillis/tutorials/asr\\_theory\\_final.ppt](Http://people.ce.gatech.edu/~kkurtis/gwillis/tutorials/asr_theory_final.ppt)> Acesso em: 31 out 2010.

ÇOPUROGLU,O., et al . Mineralogy, geochemistry and expansion testing of an alkali-reactive basalt from western Anatolia, Turkey. **Materials Characterization**. v. 60, n.7, p.756-766. julho 2009.

DAHER, C.H.S. **Avaliação do Grau de Influência de Parâmetros de Contorno no Ensaio de Reatividade Potencial Álcali-Agregado pelo Método Acelerado**. 2009. 154 f Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

DHIR, R. K. et al. **Alkali-silica reaction in concrete containing glass**. *Materials and Structures*. v. 42, n. 10, p. 1451-1462, dez 2008. Disponível em < <http://www.springerlink.com.w10065.dotlib.com.br/content/119994>>. Acesso em: 15 set 2009

FURNAS, Equipe de.; Laboratório de Concreto; , W.P. (Org.). **Reatividade potencial álcali-agregado**. In: **Concretos massa estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

GALAL, A.F., et al. **Portland-Basalt Mixed Cement**. In: **Appropriate building Materials for low cost housing: African Region, proceedings of a Symposium; Nairobi, Kenya**. 2004

JOHN, V.M. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar**. Disponível em < [http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des\\_sustentavel.htm](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des_sustentavel.htm) >. Acesso: abril 2009.

KORKANÇ, M.; TUGRUL, A. **Evaluation of selected basalts from the point of alkali-silica reactivity**. *CEMENT and CONCRETE RESEARCH*. V.35, n 3, p. 505-512, março 2005. Disponível em <doi:10.1016/j.cemconres.2004.06.013>. Acessado em 27 julho 2009.

KURTIS, K.E.; MONTEIRO, P. J. **Chemical additives to control expansion of alkali-silica reaction gel: proposed mechanisms of control**. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*. v. 38, n. 9, p. 2027-2036, maio 2003. Disponível em < <http://www.springerlink.com/content/tpl0856081254678>>. Acessado em: 30 maio 2009.

LANG, C. L. **Avaliação do uso de areia britada de origem basáltica lavada e não lavada para utilização em concreto à base de cimento Portland**. 2006. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

LIMA, O. A. de S. **Cimento de alvenaria: uma abordagem sob a ótica da Sustentabilidade**. 2009. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em:< [http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/1843/ISMS-873LXE/1/disseta\\_\\_oolavocimentoalvenaria\\_pdf.pdf](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/1843/ISMS-873LXE/1/disseta__oolavocimentoalvenaria_pdf.pdf) >. Acesso em 22 jan 2011.

MAAS, A.J.; IDEKER, H. J.; JUEGER,C.G.M. **Alkali silica reactivity of agglomerated silica fume**.*Cement and Concrete Research*, v.37, n.2, p.166-174. Fev 2007. Disponível em: < <Http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884606002717>>. Acessado em: 22 set 2009.

MAIZA, P. J., **MARFIL REATIVIDADE DE BASALTOS** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por jsnfilla@uol.com.br em 05 de out. 2010.

MAIZA, P. J., **MARFIL REATIVIDADE DE BASALTOS** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por jsnfilla@uol.com.br em 12 de out. 2010.

MAIZA, P.J. , MARFIL, S. A. Comportamiento de rocas basálticas em hormigón, frente a La reacción álcali – sílice. In: II Congresso Uruguayo de Geologia. **Actas...**, Punta Del Este, Uruguay, 1998, p. 134-137.

MAIZA, P.J. ,MARFIL, S. A. Características Petrográfico Mineralógicas de La alteración de basaltos de la meseta de somuncura. In: III REUNIÓN DE MINERALOGÍA Y METALOGÉNESIS, Argentina, **Actas...**, p.287-293 (19--?)

MAIZA,P.J.; SALOMÓN,R.C; MARFIL, S.A;BATIC, O. R. Distribucion de arcillas expansivas en fragmentos de basalto triturado. In: Reunión Técnica da AATH, 16, 2006, Mendoza. **Anais...** Mendoza.

MARFIL, S.A et al. **Relationships between SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O, and Expansion in the Determination of the Alkali Reactivity of Basaltic Rocks.** CEMENT AND CONCRETE RESEARCH. v.28, n.2, p. 189-196. fev 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00088846>> Acessado em: set 2009.

MARFIL, S.A; MAIZA,P.J.; SALOMÓN,R.C. Correlacion entre lá expansion em barras de mortero, sílice disuelta y el contenido montmorillonita em basaltos. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental,11, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis. p. 2092-2098.

MO, X. et al. **Alkali-aggregate reaction suppressed by chemical admixture at 80 °C.** Construction and Building Materials. V.19, n.6, p. 473–479. Julho 2005. Disponível em: < [http:// dx.doi.org/ 10.1016/ j.conbuildmat. 2004.07.012](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.012) >. Acesso em 31 maio 2009.

MONTANHEIRO, J.T. **Prospecção e caracterização de pozolanas na bacia do Paraná, estado de São Paulo.** 1999. 226 f. Tese (Doutoramento)- Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo.

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

MUSEU DE MINERAIS E ROCHAS HEINZ EBERT. **Banco de dados.** Coordenado por Fábio Braz Machado. Rio Claro. 2003. Disponível em: < [http:// www.rc.unesp.br/museudpm/banco/index.html](http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/index.html)>. Acesso em: 20 dez. 2010

NITA, C.; JOHN, V. M. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa.** EPUSP, 2007. Disponível em: <<http://publicacoes.pcc.usp.br/lista.htm>>. Acesso em: 01 maio 2009

PAPADAKIS, V. G. et al. **Supplementary materials in concrete. Part II: A fundamental estimation of efficiency factor.** CEMENTE AND CONCRETE RESEARCH. V. 32, n.10, p. 1533-1538. Outubro 2002. Disponível em: <doi: 10.1016/S0008-8846(02)00829-3 >. Acesso em: 22 set 2009.

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

PERGHER, S. B. C.; CORMA, A.; FORNES, V. **Pillared layered materials: preparation and properties**. Química Nova. 1999, vol.22, n.5, p. 693-709. Set/out 1999. Disponível em: < doi: 10.1590 / S0100-40421999000500013 > Acesso em: 18 ago 2010.

PETRI, S.; FULFARO, V. J. **Geologia do Brasil**. 1. ed. São Paulo : Ed. da Universidade de São Paulo ;1983.

PREZZI, Mônica et al . **Importância da química de superfície na reação álcali-agregado**. 1997. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. 1 CD ROM.

PRISZKULNIK, S. **Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto afetadas pelas Rações Cimento-Agregado**. In: ISAÍÁ, G. C. (Ed). Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações. Ibracon. 2005 . Cap. 34 p. 1017 -1070.

RüEGG, N., R.; AMARAL, G. Variação Regional da Composição Química das Rochas Basálticas da Bacia do Paraná. **Boletim IG**. São Paulo. v.7, p. 131-147, 1976.

SALLES, F.M.; OLIVEIRA, P. J. R. **Uma abordagem sobre a reatividade de basaltos com os álcalis do cimento**. 1997. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. 1 CD ROM.

SALLES, F.M.; OLIVEIRA, P. J. R; ANDRIOLO, F.R. **Uso de finos de britagem como redutores da expansão devida à reação álcali-agregado**. 1997. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1997, Goiânia. Anais...Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. 1 CD ROM.

SCHNEIDER, J.F et al. **Effect of Lithium Nitrate on the Alkali-Silica Reaction Gel**. J. Am. Ceram. Soc. v.91, n.10, p. 3370–3374. Outubro 2008. Disponível em: < DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02638.x >. Acesso em: 17 set 2009.

SCHWARZ et al. **Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash**. Cement and Concrete Research. v.30, n.6, p. 486-496. Julho 2008. Disponível em : < doi: 10.1016/ j.cemconcomp. 2008.02.001> Acesso em: set 2009.

SHAYAN, A. e XU, A. **Value-added utilization of wast glass in concrete**. Cement and Concrete Research. v.34, n.1, p. 81-89, jan 2004. Disponível em < doi: 10.1016 / S0008-8846 (03) 00251-5 >. Acesso em : 15 julho 2009.

SILVA, A. R. V.; FERREIRA H. C. **Argilas bentoníticas: Conceitos, estruturas, propriedades, usos Industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos. Setembro 2008. v.3, e.2, p.26-35. Disponível em: < <http://www.dema.ufcg.edu.br/revista/index.php/REMAP/article/viewPDFInterstitial/77/91> >. Acessado em: 19 agosto 2010.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO \_\_\_\_\_ **Press kit 2009.** Rio de Janeiro, 2009. 12p. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em: 08 out 2010.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório 2009.** Rio de Janeiro, 2009. 48p. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em: 08 out 2010.

SLADE, P. G ; QUIRK, J. P. ; NORRISH, K. **Crystalline swelling of smectite samples in concentrated NaCl solutions in relation to layer charge.** Clays and Clay Minerals, V. 39, n 3, p. 234-238, junho 1991. Disponível em:< <http://ccm.geoscienceworld.org/cgi/content/abstract/39/3/234>>. Acesso em 11 outubro 2010.

TANGO, S. **O cimento para alvenaria "Mansoy Cement" já está sendo utilizado no Brasil? Quais as suas características e propriedades, bem como as formas de aplicação?** São Paulo. PINIweb, 2000. Apresenta informações especializadas para a construção civil. Disponível em: < <http://www.piniweb.com.br/construcao/noticias/imprime83992.asp>>. Acesso em 22 jan. 2011.

TASONG, W. A. et al. **Aggregate-cement Paste. II :Influence of aggregate physical properties.** CEMENTE AND CONCRETE RESEARCH. v.28, n.10, p. 1453 – 1465 , 1998.

TAVARES, S. F.; LAMBERTS, R. Consumo de energia para construção, operação e manutenção das edificações residenciais no Brasil. ENCAC – ELACAC, Maceió, out. 2005. **Anais.**

TEIXEIRA, R.S.; PINESE, J.P.P. **Potencial de utilização do estrato superior do solo laterítico da cidade de Londrina, Estado do Paraná, como material e apoio de aterros sanitários.** Acta Sci. Technol. v. 28, n. 1, p. 85-92. Jan/Junho, 2006. Disponível em:< <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/viewFile/1291/722> >. Acesso em janeiro 2010.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado.** 2006. Dissertação (mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

TURANLI, L.; UZAL, B. BEKTAS,F. **Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements** in Cement and Concrete Research. v.35, n.6, p. 1106–1111, junho 2005. Disponível em: < [doi: 10.1016/j.cemconres.2004.07.022](http://doi:10.1016/j.cemconres.2004.07.022) >. Acesso em: 15 de maio 2009

VALDUGA, L. ; DAL MOLIN, D. C. C. ; PAULON, V. . Levantamento da reatividade potencial de basaltos no Brasil. In: II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto, 2006, Rio de Janeiro. II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto. São Paulo: IBRACON, 2006. **Anais...** p. 1-11.

VALDUGA, L. **Reação álcali-agregado-mapeamento de agregados reativos do Estado de São Paulo**. 2002. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas.

VIDAL, E. L. F. **Avaliação do comportamento de argila ativada em presença de água destilada, soluções salinas e inibidores de hidratação catiônicos**. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2009. 95 f.

VIEIRA, I.G; DAL MOLIN, D.C.C. **Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 47-63, out./dez. 2004.

WELLENKAMP, Franz-Josef. Moagens fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1999, 56p. (Série Tecnologia Mineral, 75).

WILLIAMS, H.; TURNER, F.J.; GILBERT, C. M. **Petrografia: uma introdução ao estudo das rochas em seções delgadas** . 1.ed. São Paulo: Polígono, 1970, 724p.

XIANGYN, M.; CHENJIE, Y.; ZHONGZI, X. **Long-term effectiveness and mechanism of LiOH in inhibiting alkali-silica reaction**. Cement and Concrete Research. V. 33, N.1, P.115-119. Jan 2003. Disponível em: < [linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884602009341](http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884602009341) >. Acesso em: 17 set 2009.

---

## 10 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 15: Cimento Portland – Análise Química – Determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 22:** Cimento Portland com adição de materiais pozolânicos – análise química. Método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2004

\_\_\_\_\_. **NBR 5751:** Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos – Especificação: Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-1:** Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-2:** Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2008b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-3:** Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro, 2008c.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-4:** Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008d.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-5:** Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008e.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-6:** Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto. Rio de Janeiro, 2008f.

\_\_\_\_\_. **NBR 15895** Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010

\_\_\_\_\_. **PROJETO 18:100.03-015** : Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método de Chappelle modificado . Rio de Janeiro, 2010.

**CT-OBRAS-LMCC-P-PE-001**<sup>14</sup> - "Análise petrográfica", baseado na norma ABNT NBR 7 389-2/2009- "Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 2: Agregado graúdo", da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

**CTOBRAS-LMCC-P-PE-008** – "Análise mineralógica por difratometria de raios X".

**CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-001**, Método A. NBR-NM 18/04 "Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo item 5.2

**CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-003**, Método D. Anidrido silícico (SiO<sub>2</sub>): NBR-NM 11-2/04 "Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT".

**CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-005**, Método B. Óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): NBR-NM 11-2/04 "Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT", item 5.2.1 .

**CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-006**, Método B. Óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>): NBR-NM 11-2/04 "Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT", item 5.2.2

**CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-007**, Método B. Óxido de cálcio (CaO): NBR-NM 11-2/04 "Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT", item 5.2.3 .

**CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-008**, Método B Óxido de magnésio (MgO): NBR-NM 11-2/04 "Cimento Portland - Análise química - Método optativo para determinação de óxidos principais por complexometria - Parte 2: Método ABNT", item 5.2.4 .

**CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-010**. Óxido de cálcio livre (CaO livre): NBR-NM 13/04 "Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol"

**CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-041**. "Determinação de atividade pozolânica - Método Chappelle modificado", com base em diretrizes gerais da publicação: M. Raverdy, F. Brivot, A. M. Paillere, R. Dron, "Appréciation de l'activité pouzzolannique des constituants secondaires" - 7<sup>e</sup>. Congrès International de la Chimie des Ciments, Paris - 1980, Vol. III, IV-36/41.

**CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-053 e 06** 2Óxidos de sódio (Na<sub>2</sub>O) e de potássio (K<sub>2</sub>O) totais: NBR-NM 17/04 "Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama".

<sup>14</sup> CT-OBRAS-LMCC-Q-PE : Centro de tecnologia de obras – Laboratório de Materiais de construção - Química – Procedimento de ensaio

**CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-061.** Óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) solúveis em água: ASTM C 114/07 "Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. -Sodium and Potassium Oxides" 17.2 "Water-Soluble Alkalies" e PROCEDIMENTO . "Determinação de metais por espectrofotometria por absorção atômica - Procedimento de Leitura" conforme diretrizes gerais da ASTM C 114/07.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** Tradução All Tasks. São Paulo. Thomson Learning. 561 f. 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura propriedades e materiais.** São Paulo: Pini 1994. 576p.

MOTOKI, A. **Descrição Petrográfica de Rochas Ígneas.** 2004. Disponível em: < [http:// motoki5.tripod.com />. Acesso em 12.09.09](http://motoki5.tripod.com/)

PETRI, S.; FULVARO, V. J. **Geologia do Brasil.** São Paulo. EDUSP 1988. 631p

QUARCIONI, V. A. HIDRATAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND - ABORDAGEM BIBLIOGRÁFICA. In: \_\_\_\_\_. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento portland: estudo em pasta.** 2008. 172f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 2008.

TEIXEIRA, W. et al (Org.) **Decifrando a Terra.** 2 ed. São Paulo. Companhia das Letras. 2009.

## **ANEXOS**

ANEXO A  
RESULTADOS DA ANÁLISE PETROGRÁFICA

## RESULTADOS ANÁLISES PETROGRÁFICAS E MINERALÓGICAS

- Dissertação de mestrado de Julio Cesar Filla -

### 1 MATERIAL

**1.1 Material:** duas amostras de pedrisco e de “pó micronizado”.

**1.2 Designação:** Basalto Londrina (BL) e Apucarana (BA)

**1.3 Identificação:** LMCC-P 160/10 e 161/10, respectivamente

**1.4 Procedência:** Londrina e Apucarana (PR), respectivamente

### 2 MÉTODOS UTILIZADOS

**2.1** Procedimento CT-OBRAS-LMCC-P-PE-001 - “Análise petrográfica”, baseado na norma ABNT NBR 7 389-2/2009- “Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 2: Agregado graúdo”, da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. A classificação petrográfica seguiu os critérios propostos por <sup>1</sup>LE MAITRE (1976).

Equipamento:

Microscópio modelo DM4500 P, marca Leica com câmera digital DFC295, marca Leica. Patrimônio nº 044780. CT-OBRAS/LMCC-P.

**2.2** Procedimento CTOBRAS-LMCC-P-PE-008 – “Análise mineralógica por difratometria de raios X”. Os difratogramas obtidos foram interpretados segundo as fichas de minerais do <sup>2</sup>JCPDS.

As análises objetivaram a identificação dos minerais de argila presentes nas amostras de pedrisco e de “pó micronizado”, bem como a composição (amostra total) das amostras de “pó micronizado”.

Equipamento:

Difratômetro marca Rigaku modelo Geigerflex, operando na radiação  $K_{\alpha}$  do cobre. Patrimônio nº 22 564. CT-OBRAS/LMCC.

---

<sup>1</sup> LE MAITRE, R.W. (ed.) 1989. **A classification of igneous rocks and glossary of terms:** Recommendations of the International Union of Geological Sciences - Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford. Blackwell Scientific Publications. 193 p.

<sup>2</sup> JOINT COMMITTEE ON POWDER DIFFRACTION STANDARDS – JCPDS. 1974. **Selected powder diffraction data for minerals, databook**, Swartmore. 833p.

### 3 RESULTADOS

Os resultados das análises petrográficas acham-se na TABELAS 1 e 2, em ANEXO.

Os resultados das análises mineralógicas por difratometria de raios X encontram-se na TABELA 3, a seguir.

**Tabela 3** – Resultados das análises mineralógicas por difratometria de raios X.

AMOSTRA (LMCC-P)	RESULTADOS	
<b>BL - pedrisco (160/10)</b>	<i>Fração argila</i>	Argilomineral do grupo das esmectitas (expansivos em água); argilomineral do grupo da illita (traços)
<b>BA - pedrisco (161/10)</b>	<i>Fração argila</i>	Argilomineral do grupo das esmectitas (expansivos em água) - predominantes; argilomineral do grupo da illita - subordinado
<b>BL- micronizado (160/10)</b>	<i>Amostra total</i>	Feldspato (essencial), argilominerais (subordinado), piroxênio e hematita (acessórios)
	<i>Fração argila</i>	Argilomineral do grupo das esmectitas (expansivos em água)
<b>BA - micronizado (161/10)</b>	<i>Amostra total</i>	Feldspato (essencial), argilominerais, piroxênio e hematita (acessórios)
	<i>Fração argila</i>	Argilomineral do grupo das esmectitas (expansivos em água)

### 4 CONSIDERAÇÕES

As análises efetuadas nas amostras estudadas evidenciaram que:

- Ambas amostras tratam-se petrograficamente de basaltos.
- O basalto BL exibe granulação mais grossa que o BA e encontra-se praticamente inalterado (são), enquanto o BA apresenta moderada alteração intempélica (plagioclásio, em geral, apresenta alteração em sericita segundo os planos de clivagem; grande parte dos minerais opacos acha-se alterada em hidróxidos de ferro, especialmente a partir das bordas).
- O material micronizado a partir destes basaltos revelou-se constituído predominantemente por feldspatos, com pequenas proporções de piroxênio, hematita e argilominerais, que por sua vez foram identificados como pertencentes aos grupos das esmectitas (ou da montmorilonita).

## 5 ANEXO

Anexo, Tabelas 1 e 2 ..... 2 pág.

### **EQUIPE TÉCNICA**

Maria Heloisa Barros de Oliveira Frascá – Geóloga, Dra.

Guilherme G. C. Corino Nascimento – Bolsista, graduando Geologia

Eli Arruda Toledo – Técnico

MHBOF/

## **A N E X O**

Tabelas 1 e 2

**Tabela 1** - Resultados da análise petrográfica (ABNT NBR 7 389-2/2009), finalizada em 15.07.2010.

**DESIGNAÇÃO:** Basalto Londrina (LMCC-P 160/10)

**PROCEDÊNCIA:** Londrina, PR.

**TIPO:** pedrisco

**PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS:** rocha muito coerente

### DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA

**COR:** cinza médio escuro

**ESTRUTURA:** maciça

**GRANULAÇÃO:** fina

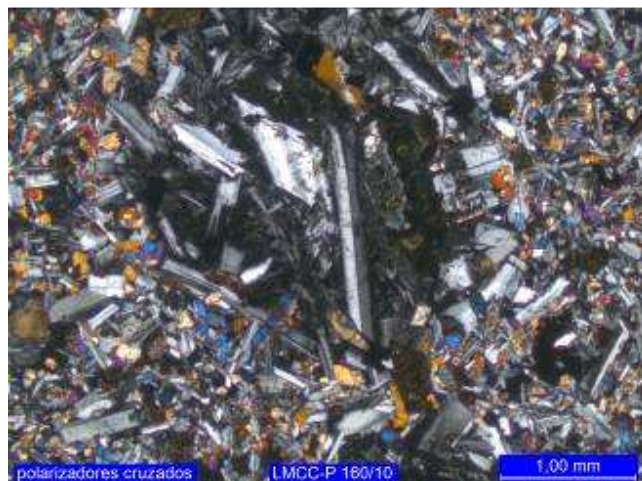
**ALTERAÇÃO:** não observado

**DESCONTINUIDADES:** não observado

### DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA - Lâmina IPT nº 11 331

**MINERAIS:** (avaliação visual - %)

Plagioclásio (labradorita)	45-50
Clinopiroxênio (augita)	35-40
Argilominerais verdes (+ castanhos)	5-10
Opacos	5
Vidro devitrificado	<5
Acessórios: apatita	tr
Secundários: hidróxidos de ferro	-



**NATUREZA:** Ígnea

**TEXTURA:** Intergranular; localmente glomeroporfírica (porção central da foto).

**GRANULAÇÃO:** Fina a média (predominantemente fina, variando entre 0,15mm e 0,6mm, poucos cristais de plagioclásio excedem 1 mm).

**GRAU DE ALTERAÇÃO:** Rocha pouco alterada. Minerais opacos podem apresentar bordas alteradas em hidróxidos de ferro.

**GRAU DE MICROFISSURAMENTO:** Fraco microfissuramento intragranular, localmente transgranular, em cristais de plagioclásio, localmente preenchidas por sericita.

**OBSERVAÇÕES:** Argilominerais verdes ocorrem principalmente na forma de microamígdalas, cujo tamanho varia entre 0,15 mm e 0,4 mm, podendo atingir até 1 mm. Argilominerais castanhos, em menores proporções, preenchem espaços intergranulares. Vidro, parcial a totalmente devitrificado em prováveis feldspatos com raros argilominerais associados, ocupam espaços intersticiais homoganeamente distribuídos pela rocha.

Os argilominerais foram identificados por difratometria de raios X como pertencentes ao grupo das esmectitas.

**CLASSIFICAÇÃO:** Basalto (segundo LE MAITRE, 1989)

**Tabela 2** - Resultados da análise petrográfica (ABNT NBR 7 389-2/2009), finalizada em 15.07.2010.

**DESIGNAÇÃO:** Basalto Apucarana (LMCC-P 161/10)      **TIPO:** pedrisco

**PROCEDÊNCIA:** Apucarana, PR.

**PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS:** rocha muito coerente

### DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA

**COR:** cinza médio

**ESTRUTURA:** maciça

**GRANULAÇÃO:** fina

**ALTERAÇÃO:** não observado

**DESCONTINUIDADES:** Lentes preenchidas por calcita e vesículas esparsas.

### DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA - Lâmina IPT nº 11 332

**MINERAIS:** (avaliação visual - %)

Plagioclásio (labradorita/andesina)      45-50

Clinopiroxênio (augita)      35-40

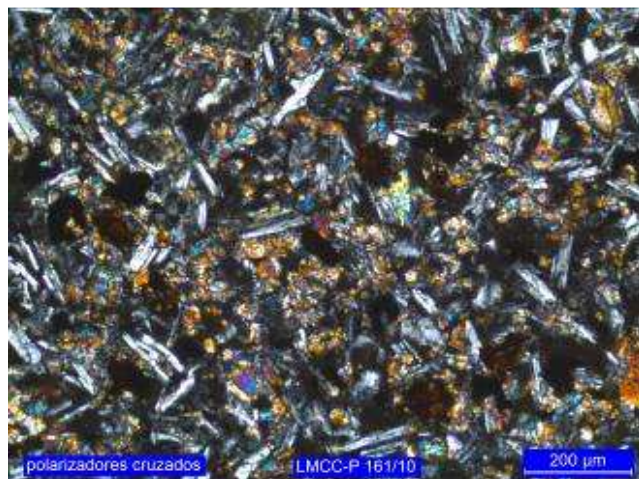
Opacos      5-10

Argilominerais castanhos      5

Vidro devitrificado      <5

Acessórios: apatita      tr

Secundários: hidróxidos de ferro      -



**NATUREZA:** Ígnea

**TEXTURA:** Intergranular, microporfirítica

**GRANULAÇÃO:** Muito fina a fina (variando, predominantemente, entre 0,04 mm e 0,2 mm, e com tamanho máximo de 0,6 mm)

**GRAU DE ALTERAÇÃO:** Rocha pouco a medianamente alterada. Plagioclásio, em geral, apresenta alteração em sericita segundo os planos de clivagem. A maior parte dos minerais opacos acha-se alterada em hidróxidos de ferro, especialmente a partir das bordas.

**GRAU DE MICROFISSURAMENTO:** Moderado microfissuramento intragranular (segundo clivagens) em plagioclásio, localmente transgranular, comumente preenchidas por sericita.

**OBSERVAÇÕES:** Argilominerais predominantemente castanhos, e vidro parcialmente devitrificado ocorrem em espaços intergranulares.

Os argilominerais foram identificados por difratometria de raios X como pertencentes ao grupo das esmectitas, predominantemente, e subordinadamente ao grupo da Illita (prováveis produtos de alteração de plagioclásio).

**CLASSIFICAÇÃO:** Basalto (segundo LE MAITRE, 1989)

ANEXO B  
RESULTADOS DA ANÁLISE DE REATIVIDADE  
ÁLCALI-AGREGADO







ANEXO C  
RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica

Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



**RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS**

**Certificado:**

290-10

**POP:**

**Data da medida:**

01 June 2010 16:58:00

**Cliente:**

HENRIQUE KAHN

**Analista:**

Andre

**Data da análise:**

01 June 2010 16:58:01

**Amostra:**

BL + BA 50/50 Microniz.

**Fonte de resultados:**

Edited

**Notas:**

Veloc. Bomba: 2500 rpm  
Meio de Dispersão: álcool isopropílico  
Ultrassom: 1 min.

**Código I.R.:**

QHD

**Amostrador:**

Hydro 2000MU (A)

**Tipo de análise:**

General purpose

**Sensitividade:**

Normal

**I.R. da partícula:**

1.729

**Absorção:**

0.1

**Faixa de tamanho:**

0.020 to 2000.000 um

**Obscurecência:**

12.96 %

**Dispersante:**

isopropyl alcohol

**I.R. do dispersante:**

1.377

**Resíduo:**

0.981 %

**Result Emulation:**

Off

**Concentração:**

0.0047 %Vol

**Span :**

1.996

**Uniformidade:**

0.62

**Tipo de distribuição:**

Volume

**Área superf. espec.:**

0.801 m<sup>2</sup>/g

**D[3,2]:**

2.826 um

**D[4,3]:**

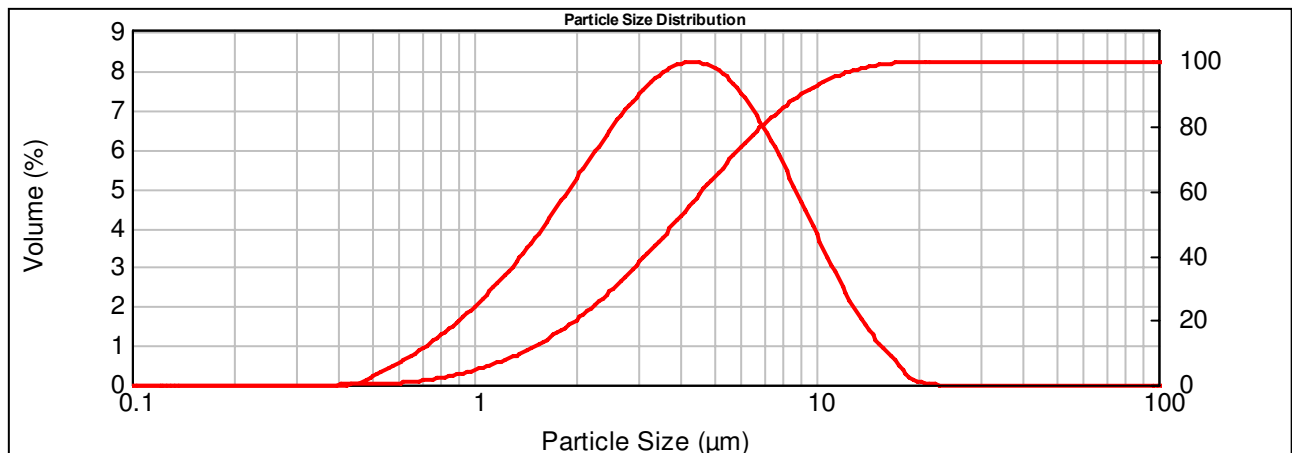
4.658 um

**d(0.1): 1.383 um**

**d(0.5): 3.856 um**

**d(0.9): 9.079 um**

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	4.50	7.096	80.98	50.238	100.00	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	6.15	7.962	85.57	56.368	100.00	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	8.15	8.934	89.50	63.246	100.00	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	10.52	10.024	92.74	70.963	100.00	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	13.32	11.247	95.28	79.621	100.00	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	16.57	12.619	97.18	89.337	100.00	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	20.30	14.159	98.49	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	24.51	15.887	99.35	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	29.20	17.825	99.86	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	34.34	20.000	99.98	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.01	3.170	39.88	22.440	100.00	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.06	3.557	45.74	25.179	100.00	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.29	3.991	51.84	28.251	100.00	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.69	4.477	58.03	31.698	100.00	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	1.28	5.024	64.19	35.566	100.00	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	2.10	5.637	70.17	39.905	100.00	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	3.17	6.325	75.81	44.774	100.00	316.979	100.00		



M.Sc. André Borges Braz  
Pesquisador do LCT-EPUSP

Dra. Maria Manuela Tassinari  
Pesquisadora do LCT-EPUSP

Prof. Dr. Henrique Kahn  
Coordenador do LCT



## RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

**Certificado:**

288-10

**POP:****Data da medida:**

01 June 2010 16:27:49

**Cliente:**

HENRIQUE KAHN

**Analista:**

Andre

**Data da análise:**

01 June 2010 16:27:50

**Amostra:**

BL - 1 Microniz.

**Fonte de resultados:**

Edited

**Notas:**

Veloc. Bomba: 2500 rpm  
Meio de Dispersão: álcool isopropílico  
Ultrassom: 1 min.

**Código I.R.:**

QHD

**Amostrador:**

Hydro 2000MU (A)

**Tipo de análise:**

General purpose

**Sensitividade:**

Normal

**I.R. da partícula:**

1.729

**Absorção:**

0.1

**Faixa de tamanho:**

0.020 to 2000.000 um

**Obscurecência:**

20.88 %

**Dispersante:**

isopropyl alcohol

**I.R. do dispersante:**

1.377

**Resíduo:**

1.219 %

**Result Emulation:**

Off

**Concentração:**

0.0076 %Vol

**Span :**

1.909

**Uniformidade:**

0.591

**Tipo de distribuição:**

Volume

**Área superf. espec.:**0.834 m<sup>2</sup>/g**D[3,2]:**

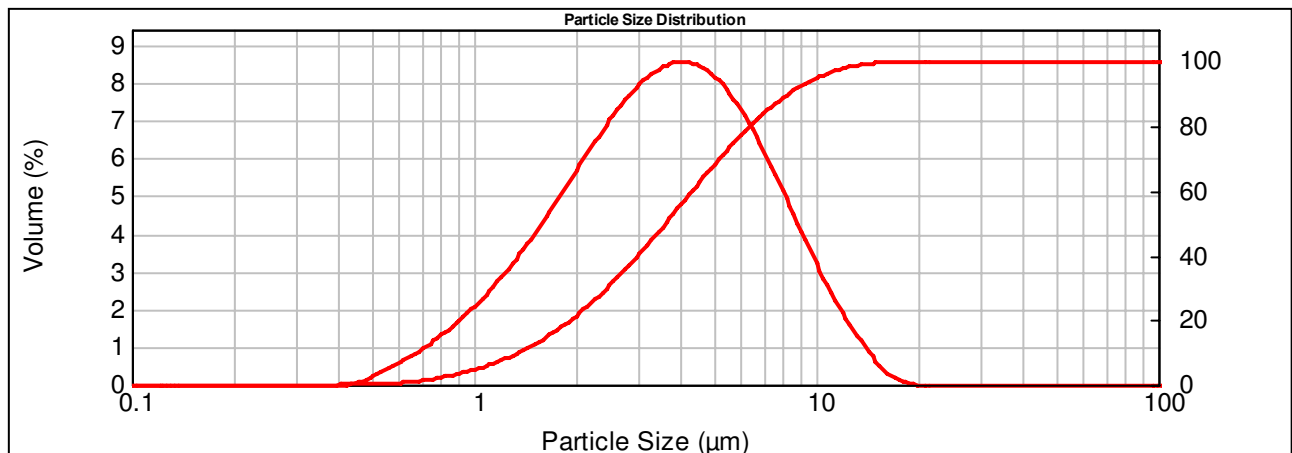
2.715 µm

**D[4,3]:**

4.321 µm

**d(0.1): 1.355 µm****d(0.5): 3.630 µm****d(0.9): 8.283 µm**

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	4.66	7.096	84.46	50.238	100.00	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	6.39	7.962	88.71	56.368	100.00	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	8.49	8.934	92.22	63.246	100.00	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	11.02	10.024	94.99	70.963	100.00	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	14.01	11.247	97.05	79.621	100.00	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	17.51	12.619	98.48	89.337	100.00	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	21.54	14.159	99.40	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	26.09	15.887	99.84	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	31.16	17.825	99.98	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	36.70	20.000	100.00	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.01	3.170	42.63	22.440	100.00	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.07	3.557	48.87	25.179	100.00	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.31	3.991	55.28	28.251	100.00	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.72	4.477	61.71	31.698	100.00	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	1.33	5.024	68.00	35.566	100.00	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	2.17	5.637	73.99	39.905	100.00	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	3.27	6.325	79.52	44.774	100.00	316.979	100.00		



M.Sc. André Borges Braz  
Pesquisador do LCT-EPUSP

Dra. Maria Manuela Tassinari  
Pesquisadora do LCT-EPUSP

Prof. Dr. Henrique Kahn  
Coordenador do LCT



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Laboratório de Caracterização Tecnológica

Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



## RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

**Certificado:**

288-10

**POP:**

**Data da medida:**

01 June 2010 16:27:49

**Cliente:**

HENRIQUE KAHN

**Analista:**

Andre

**Data da análise:**

01 June 2010 16:27:50

**Amostra:**

BL - 1 Microniz.

**Fonte de resultados:**

Edited

**Notas:**

Veloc. Bomba: 2500 rpm  
Meio de Dispersão: álcool isopropílico  
Ultrassom: 1 min.

**Código I.R.:**

QHD

**Amostrador:**

Hydro 2000MU (A)

**Tipo de análise:**

General purpose

**Sensitividade:**

Normal

**I.R. da partícula:**

1.729

**Absorção:**

0.1

**Faixa de tamanho:**

0.020 to 2000.000 um

**Obscurecência:**

20.88 %

**Dispersante:**

isopropyl alcohol

**I.R. do dispersante:**

1.377

**Resíduo:**

1.219 %

**Result Emulation:**

Off

**Concentração:**

0.0076 %Vol

**Span :**

1.909

**Uniformidade:**

0.591

**Tipo de distribuição:**

Volume

**Área superf. espec.:**

0.834 m<sup>2</sup>/g

**D[3,2]:**

2.715 um

**D[4,3]:**

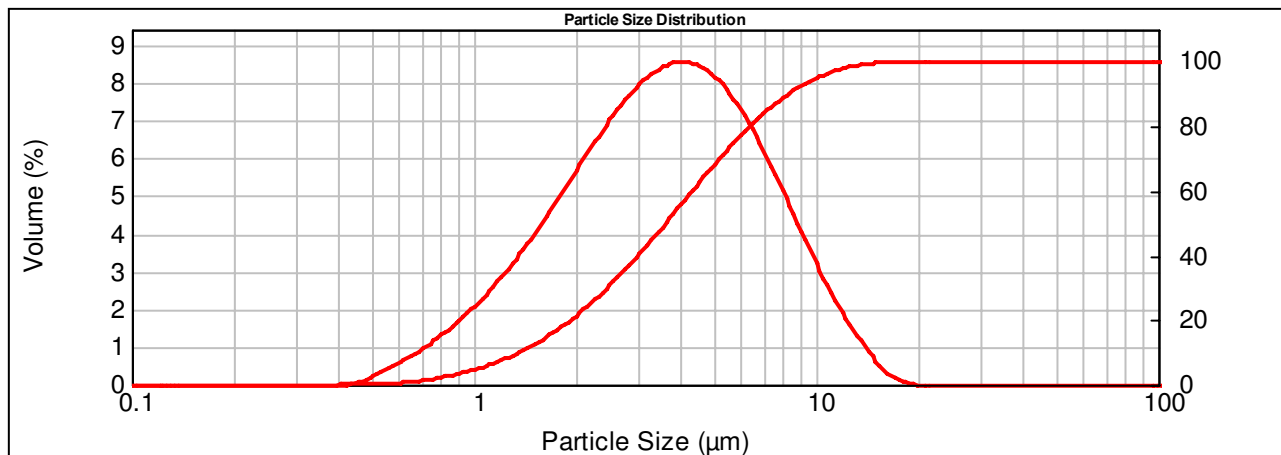
4.321 um

**d(0.1): 1.355 um**

**d(0.5): 3.630 um**

**d(0.9): 8.283 um**

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	4.66	7.096	84.46	50.238	100.00	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	6.39	7.962	88.71	56.368	100.00	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	8.49	8.934	92.22	63.246	100.00	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	11.02	10.024	94.99	70.963	100.00	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	14.01	11.247	97.05	79.621	100.00	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	17.51	12.619	98.48	89.337	100.00	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	21.54	14.159	99.40	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	26.09	15.887	99.84	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	31.16	17.825	99.98	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	36.70	20.000	100.00	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.01	3.170	42.63	22.440	100.00	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.07	3.557	48.87	25.179	100.00	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.31	3.991	55.28	28.251	100.00	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.72	4.477	61.71	31.698	100.00	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	1.33	5.024	68.00	35.566	100.00	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	2.17	5.637	73.99	39.905	100.00	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	3.27	6.325	79.52	44.774	100.00	316.979	100.00		



M.Sc. André Borges Braz  
Pesquisador do LCT-EPUSP

Dra. Maria Manuela Tassinari  
Pesquisadora do LCT-EPUSP

Prof. Dr. Henrique Kahn  
Coordenador do LCT

## CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 mu - 400.00 mu / 30 Classes

Ref da amostra : Micronizado Tipo 01/01  
 Tipo produto : BASALTO  
 Cliente : Ultrafine  
 Comentários : OS Teste Sala 07  
 Líquido : Água  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : Leandro  
 Empresa : Ultrafine  
 Localização : Indaiatuba - SP  
 Data : 19/02/2010 Hora : 15:38:50  
 Índice med. : 6482

Ultrassom : 60 s  
 Concentração : 182  
 Diâmetro a 10% : 0.64 mu  
 Diâmetro a 50% : 2.77 mu  
 Diâmetro a 90% : 7.01 mu  
 Diâmetro médio : 3.38 mu  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Medida./Limp. : 30/60/3  
 SOP : BASALTO

### Valores cumulativos particulares

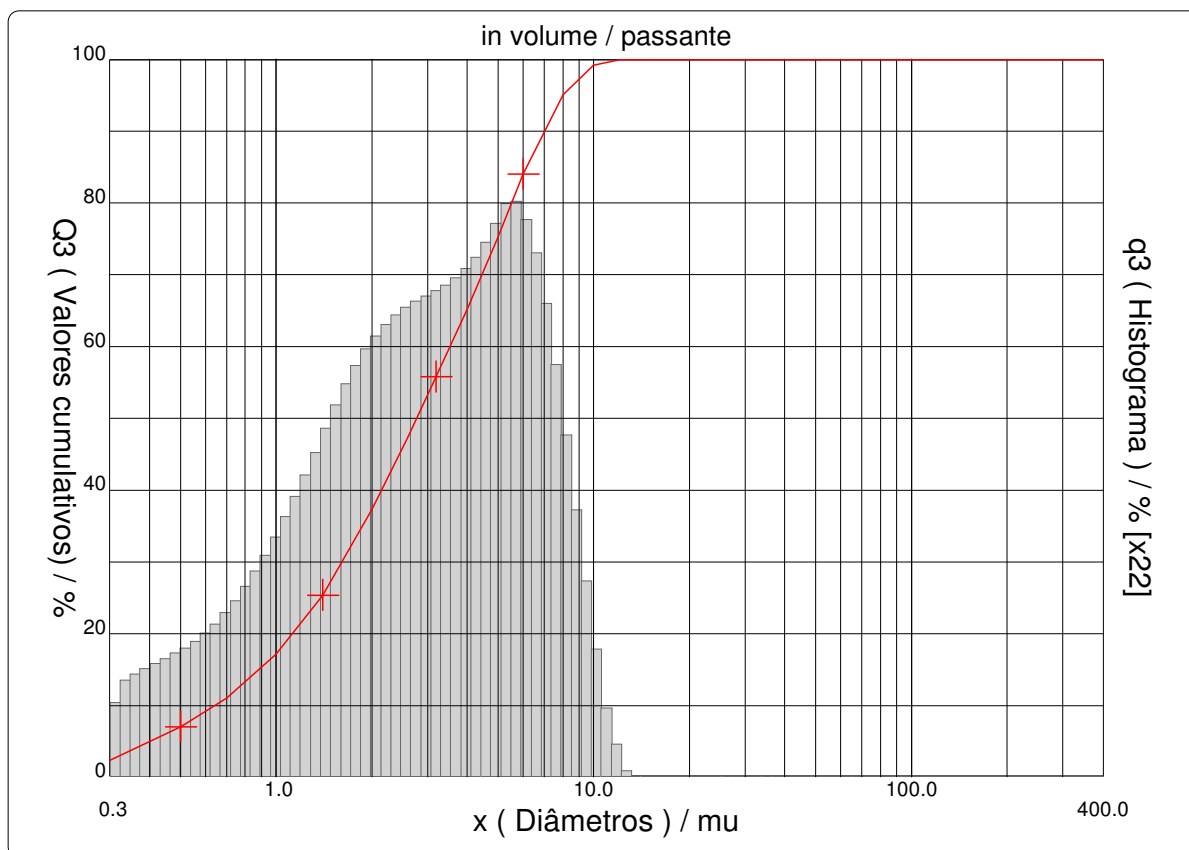
in volume / passante

x	13.00	20.00	25.00	38.00	45.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

### Porcentagem do usuário

%	95.00	99.00	100.0
Q3	7.98	9.89	12.00



## CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30  $\mu$ m - 400.00  $\mu$ m / 30 Classes

Ref da amostra	: Micronizado Tipo 01/02
Tipo produto	: BASALTO
Cliente	: Ultrafine
Comentários	: OS Teste Sala 07
Líquido	: Água
Agente dispersante	: Nenhum
Operador	: Marcelo
Empresa	: Ultrafine
Localização	: Indaiatuba - SP
Data : 23/02/2010	Hora : 16:27:28
Índice med.	: 6494

Ultrassom	: 60	s
Concentração	: 154	
Diâmetro a 10%	: 0.66	$\mu$ m
Diâmetro a 50%	: 3.00	$\mu$ m
Diâmetro a 90%	: 7.26	$\mu$ m
Diâmetro médio	: 3.57	$\mu$ m
Fraunhofer		
Densidade/Fator	-----	
Superfície específica	-----	
Diluição automática	: Não / Não	
Medida./Limp.	: 30/60/3	
SOP	: BASALTO	

### Valores cumulativos particulares

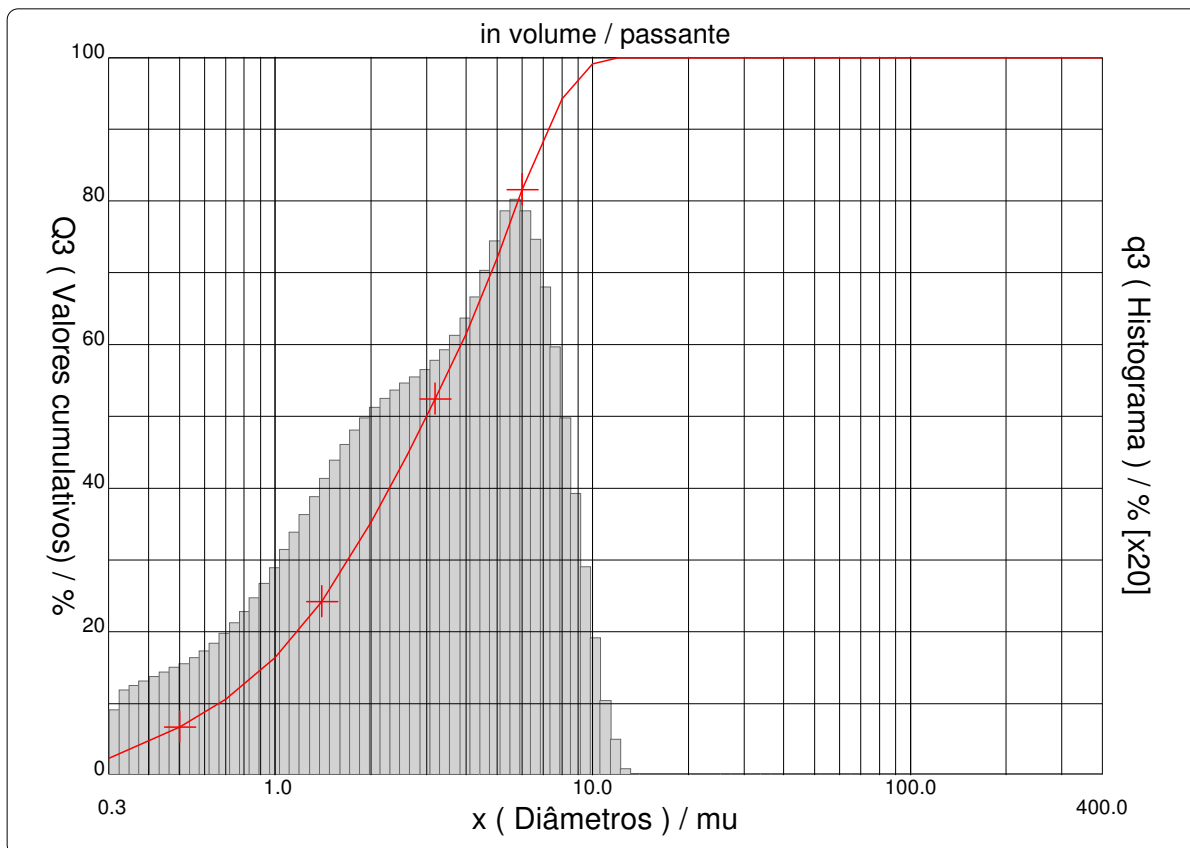
in volume / passante

x	13.00	20.00	25.00	38.00	45.00
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diâmetro /  $\mu$ m    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

### Porcentagem do usuário

%	95.00	99.00	100.0
Q3	8.28	9.97	12.00



## CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30  $\mu$ m - 400.00  $\mu$ m / 30 Classes

Ref da amostra : Micronizado Tipo 02/01  
 Tipo produto : BASALTO  
 Cliente : Ultrafine  
 Comentários : OS Teste Sala 07  
 Líquido : Água  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : Marcelo  
 Empresa : Ultrafine  
 Localização : Indaiatuba - SP  
 Data : 12/03/2010 Hora : 09:35:57  
 Índice med. : 6546

Ultrassom : 60 s  
 Concentração : 169  
 Diâmetro a 10% : 0.71  $\mu$ m  
 Diâmetro a 50% : 3.35  $\mu$ m  
 Diâmetro a 90% : 7.95  $\mu$ m  
 Diâmetro médio : 3.96  $\mu$ m  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Medida./Limp. : 30/60/3  
 SOP : BASALTO

### Valores cumulativos particulares

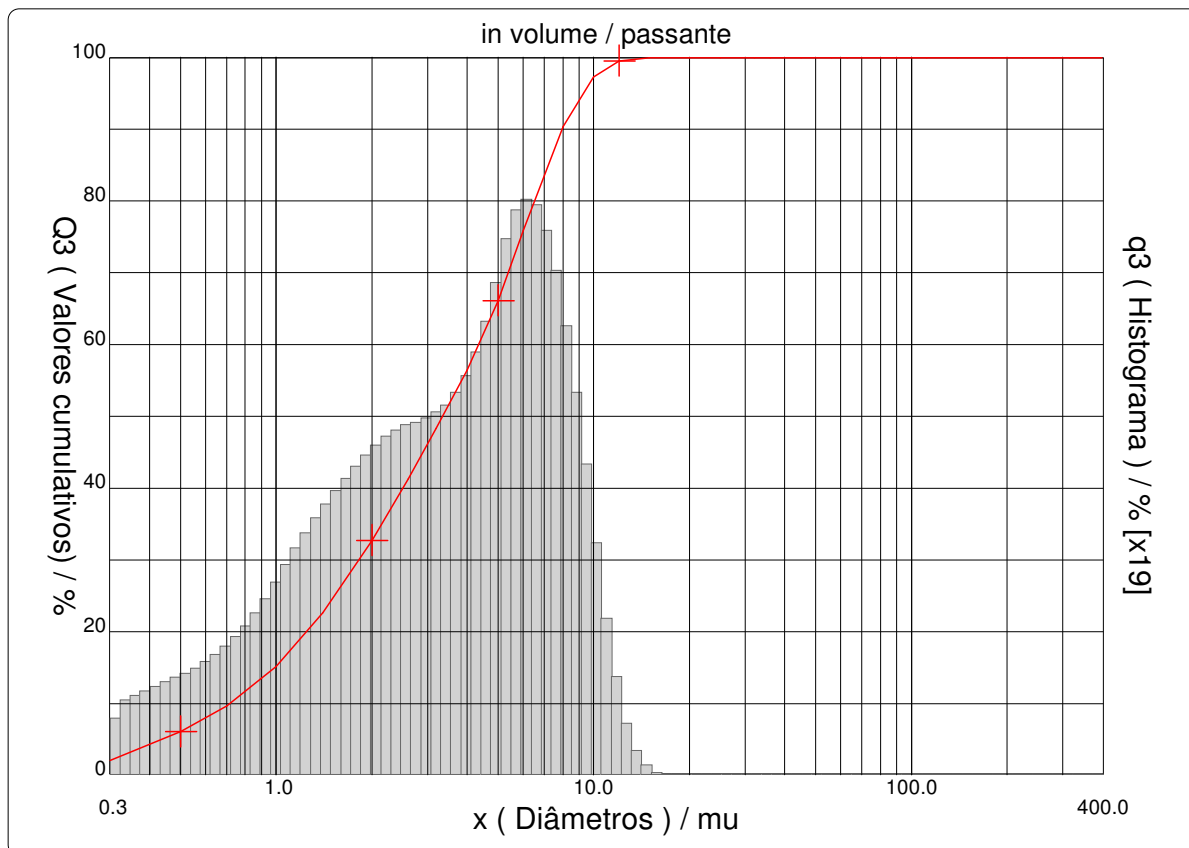
in volume / passante

x	13.00	20.00	25.00	38.00	45.00
Q3	99.87	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diâmetro /  $\mu$ m    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

### Porcentagem do usuário

%	95.00	99.00	100.0
Q3	9.28	11.46	15.00



## CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30  $\mu$ m - 400.00  $\mu$ m / 30 Classes

Ref da amostra	: Original Tipo 01
Tipo produto	: BASALTO
Cliente	: Ultrafine
Comentários	: OS Teste Sala 07
Líquido	: Água
Agente dispersante	: Nenhum
Operador	: Leandro
Empresa	: Ultrafine
Localização	: Indaiatuba - SP
Data : 19/02/2010	Hora : 15:11:36
Índice med.	: 6480

Ultrassom	: 60	s
Concentração	: 178	
Diâmetro a 10%	: 2.25	$\mu$ m
Diâmetro a 50%	: 19.71	$\mu$ m
Diâmetro a 90%	: 45.35	$\mu$ m
Diâmetro médio	: 22.26	$\mu$ m
Fraunhofer		
Densidade/Fator	-----	
Superfície específica	-----	
Diluição automática	: Não / Não	
Medida./Limp.	: 30/60/3	
SOP	: BASALTO	

### Valores cumulativos particulares

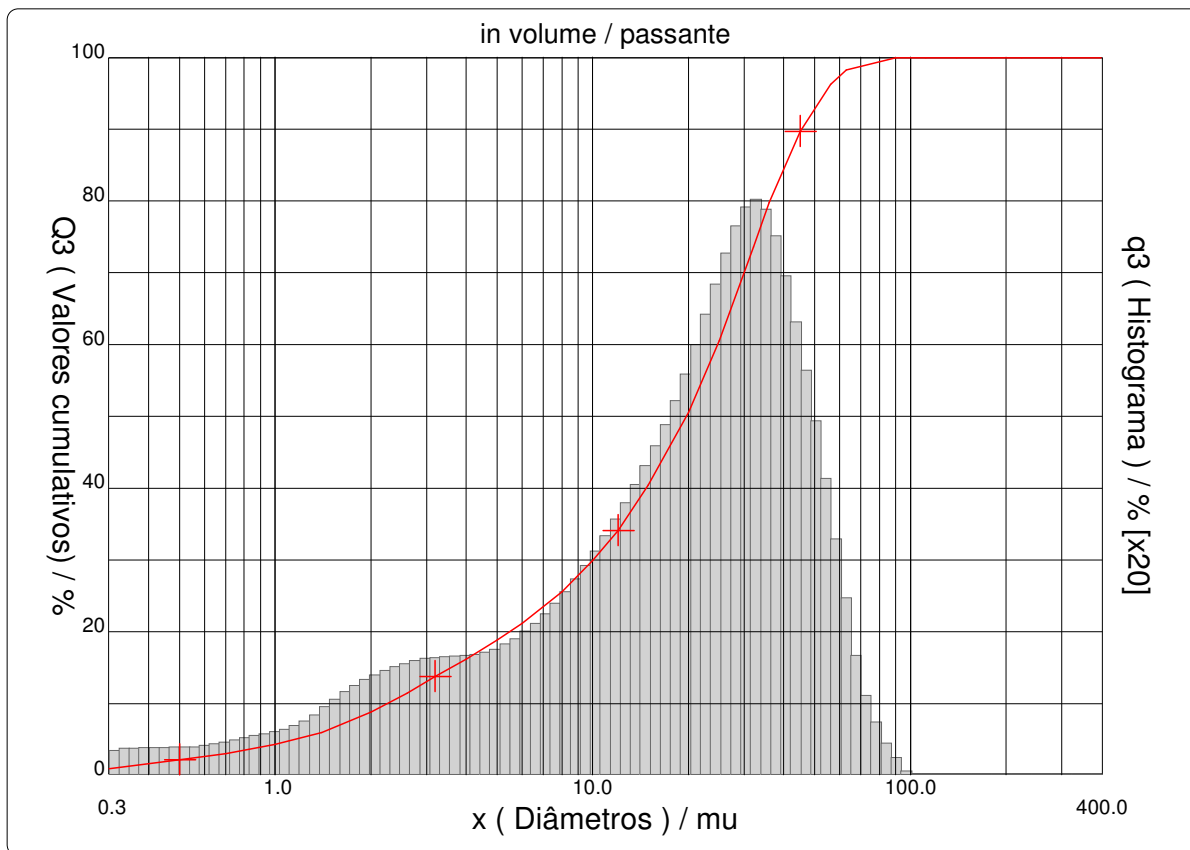
in volume / passante

x	13.00	20.00	25.00	38.00	45.00
Q3	36.22	50.51	60.50	82.49	89.77

x : diâmetro /  $\mu$ m    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

### Porcentagem do usuário

%	95.00	99.00	100.0
Q3	53.63	73.23	90.00



Faixa : 0.30  $\mu$ m - 400.00  $\mu$ m / 30 Classes

Ref da amostra	: Original Tipo 02
Tipo produto	: BASALTO
Cliente	: Ultrafine
Comentários	: OS Teste Sala 07
Líquido	: Água
Agente dispersante	: Nenhum
Operador	: Leandro
Empresa	: Ultrafine
Localização	: Indaiatuba - SP
Data : 19/02/2010	Hora : 15:23:49
Índice med.	: 6481

Ultrassom	: 60	s
Concentração	: 186	
Diâmetro a 10%	: 1.60	$\mu$ m
Diâmetro a 50%	: 14.24	$\mu$ m
Diâmetro a 90%	: 38.93	$\mu$ m
Diâmetro médio	: 17.65	$\mu$ m
Fraunhofer		
Densidade/Fator	-----	
Superfície específica	-----	
Diluição automática	: Não / Não	
Medida./Limp.	: 30/60/3	
SOP	: BASALTO	

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	13.00	20.00	25.00	38.00	45.00
Q3	47.03	62.04	71.31	89.47	94.84

x : diâmetro /  $\mu$ m    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

Porcentagem do usuário

%	95.00	99.00	100.0
Q3	45.39	56.95	90.00

