



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

LEONARDO GUERRA

**VIABILIDADE TÉCNICA DA ADIÇÃO DE FINOS DE  
BASALTO À PASTA DE CIMENTO *PORTLAND***

---

Londrina  
2013

**LEONARDO GUERRA**

**VIABILIDADE TÉCNICA DA ADIÇÃO DE FINOS DE  
BASALTO À PASTA DE CIMENTO *PORTLAND***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação *Stricto Sensu* – Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Morales

Londrina  
2013

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

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

G934v	Guerra, Leonardo. Viabilidade técnica da adição de finos de basalto à pasta de cimento portland / Leonardo Guerra. – Londrina, 2013. 97 f. : il. + anexos no final da obra.  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, 2013. Inclui bibliografia.  1. Basalto – Teses. 2. Cimento portland – Aditivos – Teses. 3. Concreto – Teses. 4. Pavimentos – Teses. I. Morales, Gilson. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. P Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.  CDU 691.54
-------	--

LEONARDO GUERRA

**VIABILIDADE TÉCNICA DA ADIÇÃO DE FINOS DE BASALTO À  
PASTA DE CIMENTO *PORTLAND***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação Stricto Sensu – Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Gilson Morales  
UEL – Londrina – PR

---

Prof. Dr. Mário Stamm Jr.  
UEL – Londrina – PR

---

Prof. Dr. Sérgio Henrique Pialarissi Cavalaro  
UEL – Londrina – PR

Londrina, 14 de fevereiro de 2013..

*"Eu acredito, eu luto até o fim: não há como perder, não há como não vencer."*

Oleg Taktarov

*"O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário."*

Albert Einstein

## **AGRADECIMENTOS**

Minha gratidão, em primeiro lugar, a Deus, por estar comigo em todos os momentos, me iluminando, sendo meu refúgio e fortaleza nos momentos mais difíceis. A Ele agradeço por todas as vitórias e conquistas alcançadas durante a minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Gilson Morales, pela orientação segura e atenciosa, que contribuiu muito no desenvolvimento deste trabalho, e pela oportunidade oferecida. Pela amizade e confiança demonstradas, meus sinceros agradecimentos.

Aos professores, Dr. Alexandre Urbano, do Laboratório de DRX da UEL, e MSc Thiago Melanda Mendes, da UTFPR, pela valiosa colaboração.

A minha esposa Amanda, que me apoiou e demonstrou muita paciência nesta fase importante de minha vida.

À Universidade Estadual de Londrina, pelo programa de mestrado oferecido e pelo acolhimento a mim dispensado nestes dois anos.

A todos vocês, minha eterna gratidão!

GUERRA, Leonardo. **Viabilidade técnica da adição de finos de basalto à pasta de cimento *Portland*** 2013. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013.

## RESUMO

A utilização crescente de adições minerais no processo de fabricação do cimento Portland vem sendo intensificada cada vez mais, sendo grande parte dela composta por resíduos provenientes de indústrias mineradoras, siderúrgicas e usinas termelétricas. O foco deste estudo é o resíduo de britagem (RB) do basalto, subproduto da indústria mineradora, gerado através do processo de cominuição das rochas para produção de agregados utilizados na construção civil. O interesse comercial por este material é muito inferior em relação aos agregados produzidos, o que justifica sua pequena demanda. Este trabalho tem como objetivo avaliar a interferência da adição de finos de basalto nas propriedades mecânicas do cimento Portland. O material utilizado neste estudo foi coletado junto à pedreira localizada na região metropolitana de Londrina – Paraná, sendo este, caracterizado por meio dos seguintes ensaios: granulometria à laser, massa específica, massa unitária, superfície específica, difração de Raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Foram analisadas pastas compostas por cimento Portland CP-V ARI e diferentes teores de RB. As propriedades mecânicas destas composições foram avaliadas por meio de corpos de prova cilíndricos de argamassa, segundo o traço unitário em massa 1:3, rompidos à compressão axial. Os resultados obtidos demonstraram que, em função das características físicas do RB, sua incorporação em substituição parcial ao cimento Portland trouxe ganhos na resistência mecânica da pasta para valores de 2,5% em relação ao cimento CP-V ARI de referência, bem como foi observada a ocorrência de pontos de nucleação na microestrutura da pasta. Esta pesquisa vem contribuir para a aplicação do RB como material alternativo incorporado ao cimento Portland, destacando sua aplicação na execução de bases de rodovias.

**Palavras-chave:** Resíduo de britagem basáltica. Base de pavimentos. Eco eficiência. Efeito de nucleação. Filer basáltico. Cimento *Portland* com adições.

GUERRA, Leonardo. **Technical feasibility of fine basalt addition in *Portland cement paste*** 2013. 97p. Dissertation (Master in Buildings and Sanitation Engineering) - State University of Londrina, Londrina, 2013.

## ABSTRACT

To meet the demand of inputs for construction the increasing use of mineral additions has been much intensified, with much of it being composed of waste from mining industries, steel mills and power plants. Noteworthy are the uses of silica fume, fly ash, blast furnace slag and waste crushing (WC). The WC is a byproduct of the mining industry, generated through the process of crushing rocks for the production of aggregates used in construction. Currently, the use of this waste is quite restricted in the production of concrete, due to its characteristics. The commercial interest in this material is much lower compared to the aggregates produced, which justifies its small demand. Notably, the extraction process and basalt rock grinding generates a large volume of waste. It is believed that, depending on the physical characteristics of WC, its incorporation into the Portland cement can bring gains in strength and durability to the concrete. This study aims to evaluate the effect of adding fine basalt on the mechanical properties of Portland cement. For that, a bibliographic review was initially conducted to know the experiences in Brazil, involving testing and performance evaluation of the WC. The material used in this study comes from quarries located in the region of Londrina - Paraná, and was characterized by the following tests: granulometric analysis by sedimentation (laser), density, bulk density, specific surface area, X-Ray diffraction and electron microscopy (EM). We analyzed pastes composed of Portland cement CPV-ARI and different levels of WC. The mechanical properties of the pastes were evaluated using specimens of cylindrical mortar according to the mix-design mass 1:3, ruptured to axial compression. We studied the interference of these additions on the mechanical performance and morphology of these compositions, focusing on the incorporation of light strips and optical of eco efficiency. The study aims to indirectly reduce the rate of CO<sub>2</sub> emissions, due to the reduced consumption of Portland cement to the substitution proposed. The obtained results demonstrated that, on the basis of physical characteristics of RB, its incorporation in partial replacement to Portland cement brought gains in mechanical strength of the folder for values of 2.5% in relation to the cement CP-V reference, as was observed the occurrence of nucleation points on the microstructure of the folder. This research contributes to the application of alternative material incorporated into RB Portland cement, highlighting its application in execution of highways.

**Keywords:** Basalt crushing waste. Alternative cement. Eco efficiency. Effect of nucleation. Basaltic filler. Portland cement with additions.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 01</b>	– Limites geográficos da Bacia do Paraná.....	18
<b>Figura 02</b>	– Mapa geológico do Paraná .....	19
<b>Figura 03</b>	– Amostra de rocha basáltica encontrada na Região Norte do Paraná .....	21
<b>Figura 04</b>	– Empacotamento de partículas constituintes do cimento.....	40
<b>Figura 05</b>	– Hidratação do silicato de cálcio em pasta de cimento Portland .....	46
<b>Figura 06</b>	– Cristais pseudo-hexagonais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e fibrilas de C-S-H tipo (I) (1.400X).....	47
<b>Figura 07</b>	– Exsudação do concreto .....	48
<b>Figura 08</b>	– Produtos externos da hidratação .....	49
<b>Figura 09</b>	– Produtos internos da hidratação .....	50
<b>Figura 10</b>	– Concreto sem adições minerais (esquerda) e com adições minerais (direita) .....	51
<b>Figura 11</b>	– Pasta de cimento com 2,5 % de finos de basalto .....	53
<b>Figura 12</b>	– Pasta de cimento com 5 % de finos de basalto .....	53
<b>Figura 13</b>	– evolução da resistência mecânica do cimento ARI em função da idade .....	56
<b>Figura 14</b>	– Suspensão do RB <i>in natura</i> em repouso para sedimentação.....	59
<b>Figura 15</b>	– Remoção da suspensão contendo RBF .....	60
<b>Figura 16</b>	– Remoção da suspensão contendo RBF .....	60
<b>Figura 17</b>	– Material decantado .....	61
<b>Figura 18</b>	– Coleta do Material decantado .....	61
<b>Figura 19</b>	– Secagem do RB em estufa .....	62
<b>Figura 20</b>	– Materiais utilizados na produção de argamassa .....	63
<b>Figura 21</b>	– Corpos de prova de argamassa moldados em formas metálicas (5x10cm).....	63
<b>Figura 22</b>	– Corpos de prova de argamassa após cura por imersão .....	64
<b>Figura 23</b>	– Corpo de prova de argamassa rompido por compressão axial.....	64
<b>Figura 24</b>	– Recipientes contendo testemunhos extraídos dos corpos de prova submetidos à compressão diametral .....	65
<b>Figura 25</b>	– Moldagem da amostra de pasta com RB em mangueira plástica de 5mm de diâmetro .....	66

<b>Figura 26</b> – Amostra de pasta de cimento recoberta com ouro para análise no microscópio de varredura .....	67
<b>Figura 27</b> – Microscópio eletrônico de varredura e micro análise do Laboratório de Microscopia da UEL.....	67
<b>Figura 28</b> – Distribuição gráfica da análise granulométrica do cimento .....	68
<b>Figura 29</b> – Características do cimento Portland CP-V ARI.....	69
<b>Figura 30</b> – Distribuição gráfica da análise granulométrica do RB <i>in natura</i> .....	70
<b>Figura 31</b> – Distribuição gráfica da análise granulométrica da fração fina de RB (RBF) entre 1-10 micrômetros .....	70
<b>Figura 32</b> – Distribuição gráfica da análise granulométrica da fração grossa ou intermediária de RB (RBG) entre 10-100 micrômetros .....	71
<b>Figura 33</b> – Granulometria a laser das amostras de cimento Portland CP- V ARI, do resíduo de basalto <i>in natura</i> e das frações grossa (RBG) e fina (RBF) .....	71
<b>Figura 34</b> – Curvas granulométricas do cimento Portland CP V ARI , resíduo basáltico <i>in natura</i> (RB), resíduo basáltico grosso (RBG) e resíduo basáltico fino (RBF).....	72
<b>Figura 35</b> – Amostra de pasta de cimento CP-V ARI com 15% de RBF (Ampliação da imagem em 8.000 vezes).....	74
<b>Figura 36</b> – Ampliação da imagem da figura 35 com a visualização da formação dos cristais de C-S-H na superfície do grão de basalto (RBF) (Ampliação da imagem em 15.000 vezes).....	75
<b>Figura 37</b> – Resultado da aplicação da Sonda EDS na amostra da figura 35 .....	75
<b>Figura 38</b> – Ocorrência do efeito de nucleação pelos grãos de RB com a deposição de produtos cimentícios na superfície dos grãos de basalto (Ampliação da imagem em 15.000 vezes) .....	76
<b>Figura 39</b> – Análise das amostras de RB, RBF e RBG por difração de Raios-X .....	76
<b>Figura 40</b> – Distribuição do tamanho das partículas do cimento CP-V ARI e do RBF.....	77
<b>Figura 41</b> – Distribuição do tamanho das partículas do cimento CP-V ARI e do RBG .....	78
<b>Figura 42</b> – Curvas de distribuição discreta das partículas do Cimento CP-V ARI, do RB <i>in natura</i> , do RBG e do RBF .....	78

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b> – Distribuição dos principais grupos de substâncias minerais encontradas no Estado do Paraná.....	19
<b>Tabela 02</b> – Composição de basaltos em óxidos (porcentagem em peso).....	20
<b>Tabela 03</b> – Composição geoquímica das rochas basálticas de quatro regiões da Bacia do Paraná (Rüegg; Amaral, 1976).....	21
<b>Tabela 04</b> – Número de empresas de extração de minerais no Paraná e em Londrina .....	25
<b>Tabela 05</b> – Número de empregos na indústria de Extração de Minerais no Paraná, e em Londrina .....	26
<b>Tabela 06</b> – Valor da operação, arrecadação e repasse da compensação financeira pela exploração mineral – CFEM no Paraná, 2004 a 2010 – em milhões de R\$ .....	26
<b>Tabela 07</b> – Produção e consumo de Cimento no Paraná e no Brasil .....	35
<b>Tabela 08</b> – Composição dos cimentos com RB .....	62
<b>Tabela 09</b> – Resultado da análise granulométrica do cimento utilizado .....	68
<b>Tabela 10</b> – Resultado da análise granulométrica do RB <i>in natura</i> .....	69
<b>Tabela 11</b> – Resultado da análise granulométrica da fração fina de RB (RBF) entre 1-10 micrômetros .....	70
<b>Tabela 12</b> – Resultado da análise granulométrica da fração intermediária ou grossa do RB (RBG) entre 10-100 micrômetros .....	71
<b>Tabela 13</b> – Massa específica do RB <i>in natura</i> .....	72
<b>Tabela 14</b> – Resistência média compressão dos corpos de prova de argamassa ao 7 dias.....	73
<b>Tabela 15</b> – Resistência à compressão aos 7 dias dos cimentos CPV-ARI com RBF .....	80
<b>Tabela 16</b> – Resistência à compressão aos 7 dias dos cimentos CPV-ARI com RBG .....	80
<b>Tabela 17</b> – Comparação da resistência de cimento com iguais teores de RBF e RBG .....	80

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVO GERAL .....	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4	HIPÓTESES.....	17
1.5	CONTRIBUIÇÃO ESPERADA.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1	BASALTO .....	18
2.1.1	Características Gerais .....	18
2.1.2	O Resíduo de Basalto.....	23
2.1.3	A Produção de Agregados Basálticos no Paraná.....	24
2.2	CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL.....	27
2.3	CIMENTO PORTLAND .....	32
2.3.1	Histórico do Cimento Portland .....	32
2.3.2	Tipos de Cimento Portland .....	35
2.4	ADIÇÕES MINERAIS .....	37
2.4.1	Dados Gerais.....	38
2.4.2	Tipos de Adições .....	40
2.4.2.1	Sílica ativa.....	41
2.4.2.2	Cinza volante .....	42
2.4.2.3	Escória de alto forno .....	43
2.4.2.4	Cinza de casca de arroz .....	43
2.4.2.5	Filer calcário .....	44
2.4.2.6	Cal hidratada .....	44
2.5	MICROESTRUTURA .....	45
2.5.1	Microestrutura da Pasta de Cimento .....	45
2.5.2	Desempenho das Adições na Microestrutura da Pasta de Cimento.....	51
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	54
3.1	MATERIAIS.....	55
3.1.1	Cimento Portland.....	55

3.1.2	Agregado Miúdo .....	56
3.1.3	Água .....	56
3.1.4	Resíduos de Britagem - RB .....	56
3.2	MÉTODO .....	57
3.2.1	Amostragem de RB .....	57
3.2.2	Caracterização dos Materiais .....	58
3.2.2.1	Cimento .....	58
3.2.2.2	Resíduo de britagem in natura .....	58
3.2.2.2.1	<i>Granulometria a laser</i> .....	58
3.2.2.2.2	<i>Massa específica do RB in natura</i> .....	59
3.2.2.3	Estratificação do RB por sedimentação .....	59
3.2.2.4	Composição das pastas de cimentos com RB .....	62
3.2.2.5	Avaliação da resistência mecânica à compressão dos cimentos com RB .....	63
3.2.2.6	Verificação do efeito de nucleação na pasta de cimento por microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>68</b>
4.1	CIMENTO PORTLAND .....	68
4.1.1	Análise Granulométrica .....	68
4.1.2	Outras Características do Cimento .....	69
4.2	RESÍDUO DE BRITAGEM (RB) .....	69
4.2.1	Análise Granulométrica .....	69
4.3	MASSA ESPECÍFICA DO RB .....	72
4.4	RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS COM RB .....	73
4.5	ANÁLISE DA PASTA DE CIMENTO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) .....	74
<b>5</b>	<b>COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES</b> .....	<b>77</b>
5.1	MASSA ESPECÍFICA .....	77
5.2	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	77
5.3	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X .....	79
5.4	RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS COM RB .....	79

5.5	ANÁLISE DA PASTA DE CIMENTO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) .....	82
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	83
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	86
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	87
	<b>ANEXOS</b> .....	93
	ANEXO A – i, ii, iii e iv .....	94

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização crescente de adições minerais para suprir a demanda de materiais para a construção civil vem sendo intensificada cada vez mais, sendo grande parte delas composta por resíduos provenientes de indústrias mineradoras, siderúrgicas e usinas termelétricas, com destaques para a sílica ativa, cinza volante, escória de alto-forno e resíduo de britagem (RB).

O RB é um dos subprodutos da indústria mineradora, gerado no processo de britagem das rochas para produção de agregados para a construção civil. Particularmente, no processo de extração e moagem das rochas basálticas ocorre a geração de um grande volume de resíduos. Atualmente, o uso deste resíduo é bastante restrito na produção de concretos, em função de suas características, sendo o seu interesse comercial muito inferior em relação aos agregados produzidos no processo, o que justifica sua pequena demanda. Acredita-se que, em função das características do RB, sua incorporação ao cimento Portland pode trazer ganhos à resistência mecânica dos concretos com ele produzidos, em função do melhor empacotamento das misturas resultante da adequação granulométrica que se traduz no aumento da densidade e na redução da porosidade dos concretos. Estes fatores garantem maior durabilidade ao concreto, reduzindo os riscos de penetração de agentes e contaminantes agressivos.

No Brasil, o volume de RB tem aumentado consideravelmente devido à produção de areias artificiais através da britagem de rochas basálticas. O uso deste tipo de agregado miúdo está em crescente evolução, devido à elevada demanda por quantidades expressivas de agregados para concreto, decorrente do desenvolvimento do país. Em paralelo, está se tornando cada vez mais inviável a utilização de areias naturais, extraídas dos leitos dos rios, devido à escassez de jazidas, aos efeitos nocivos de sua extração e à logística de transporte. De acordo com estimativas junto à pedreira estudada, observou-se a ocorrência da geração de resíduos na ordem de 2 a 4% do volume da rocha submetida à cominuição.

O Instituto Ambiental do Paraná – IAP, cada vez mais comprometido com a preservação estas reservas naturais e com a garantia da qualidade de vida aquática, tem intensificado a fiscalização junto às unidades produtoras de agregados. Por outro lado, há de se preocupar com os enormes passivos ambientais gerados na produção destes agregados.

Com a preocupação em se produzir construções eco eficientes, compatíveis com as diretrizes do desenvolvimento sustentável, a produção de concretos, tanto em nível nacional, como internacional, se volta para a incorporação de rejeitos industriais, como por exemplo, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz, as fibras de borracha, as cinzas volantes, entre outros.

Desta forma, o assunto está sendo amplamente discutido em diferentes fóruns, congressos, revistas técnicas e institutos de pesquisas, voltando-se para a política da eficiência energética, da adequação das matrizes energéticas e da redução de gases geradores do efeito estufa, principalmente do CO<sub>2</sub>. (IPEA, 2010).

Como a fabricação do cimento é um dos maiores geradores de CO<sub>2</sub> na indústria da construção, com valores médios de 1000 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínquer Portland produzido, a incorporação de RB ao cimento é uma forma de minimizar este problema, já que o concreto de cimento Portland é um dos materiais mais utilizados pela construção civil no mundo, em função de sua alta resistência mecânica, facilidade de ser moldado para os mais diversos tipos de obra e custo relativamente baixo, quando comparado a outros materiais. Os cimentos com adições apresentam uma diluição deste teor de CO<sub>2</sub>, chegando-se a valores próximos aos 800kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento Portland.

Segundo Mehta (2001), a produção mundial anual de cimento em 2001, foi de, aproximadamente, 1,6 bilhões de toneladas, responsável por 7% da emissão global de dióxido de carbono na atmosfera. Segundo dados da organização representativa da indústria de cimento na Europa - The European Cement Association (Cembureau), esta produção aumentou para, aproximadamente, 3,3 bilhões de toneladas, das quais 2% corresponderam à produção brasileira em 2011, o que equivale a 58 milhões de toneladas.

O Paraná é um importante produtor de cimento, respondendo por cerca de 10% da produção nacional. Em 2008, o Paraná produziu 5,31 milhões de toneladas de cimento e em 2009, produziu 5,33 milhões de toneladas.

Em 2010, o Paraná produziu 5,68 milhões de toneladas de cimento, participando com 9,6% da produção nacional, que foi de 59 milhões de toneladas. No mesmo ano, o consumo no Paraná foi de 3,75 milhões de toneladas, com crescimento de 21,1% em relação à 2009. A diferença entre o volume de material consumido foi destinado à exportação (MINEROPAR, 2009)

O consumo de cimento no concreto costuma ser, em massa, até 20% e o restante de agregados, o que representa um consumo mundial anual da ordem de 27 bilhões de toneladas de agregados. (MINEROPAR, 2009).

Considerando-se que, na indústria do cimento, 90% da emissão de CO<sub>2</sub> ocorre nos fornos de clínquerização, Mehta (2001) propõe que o setor da construção repense a fórmula e o próprio uso do concreto, numa proposta que inclui a atuação em três frentes, mas que têm uma palavra em comum: redução. Defende que se consuma menos concreto nas novas estruturas, menos cimento nas misturas para concreto e que se reduza o volume de clínquer para produzir o cimento.

Segundo o mesmo autor, cerca de 50% a 70% da massa de clínquer presente no cimento Portland pode ser substituída por diversos materiais complementares, dentre os quais, as cinzas volantes, as pozolanas naturais e as cinzas de casca de arroz. Esta redução de clínquer no cimento Portland, e de cimento no concreto, visa acentuar o caráter eco eficiente do material, e também propõe que, pelo menos, duas destas adições sejam utilizadas de forma complementar ao clínquer, substituindo 40% de sua massa (Téchné, 2008). Esta alternativa aparece nos dias atuais como questão fundamental na preservação do meio ambiente, tanto em função da redução do consumo de recursos naturais, quanto da minimização dos impactos ambientais oriundos da disposição final dos resíduos.

A adição de minerais finamente moídos ao cimento, denominados filler, é prática comum na moderna tecnologia de produção do cimento e do concreto. Estas adições podem trazer melhorias à trabalhabilidade e contribuir com a durabilidade dos concretos. Tecnicamente, a garantia da durabilidade é uma das razões mais relevantes para o uso destas adições, especialmente na produção de cimentos, em função da redução do calor de hidratação e da ocorrência do efeito filler de colmatação de vazios na pasta.

Há, também, justificativas econômicas, pois o emprego de adições minerais na fabricação do cimento implica na redução do consumo de clínquer, que é obtido a temperaturas médias da ordem de 1450°C, o que se reflete no custo de produção do cimento Portland. É importante ressaltar que estas adições, tanto podem desenvolver reações químicas junto aos compostos do cimento, como melhorar o desempenho dos concretos, provocando o refinamento dos poros e

aumentando sua densidade, contribuindo para o desenvolvimento de maiores resistências mecânicas, menor permeabilidade e, conseqüentemente, maior vida útil.

A caracterização do RB e o estudo da viabilidade de aproveitamento destes resíduos nos processos de fabricação de artefatos de cimento é o objeto deste estudo, tendo em vista que a utilização deste material desperta grande interesse na comunidade científica. Portanto, este material merece mais atenção por parte dos pesquisadores, visando mudar sua conotação de resíduo e agregando-lhe maior valor, especialmente para o setor da construção civil.

Esta pesquisa vem contribuir para a aplicação do RB gerado nos britadores de rochas basálticas localizados na Região Norte do Paraná, como material alternativo.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Com o aumento da produção de agregados no Estado do Paraná, cresceu proporcionalmente a geração dos resíduos de britagens (RB), dando origem a um passivo ambiental.

Este trabalho visa identificar melhores alternativas para o destino dos RB, como sua utilização na construção civil, e assim contribuir com a eco eficiência sob a óptica do desenvolvimento sustentável.

### 1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica da adição de finos de basalto à pasta de cimento Portland.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a interferência da adição de resíduo de britagem nas propriedades mecânicas da pasta de cimento Portland.
- Verificar o efeito do resíduo de britagem (RB) na microestrutura da pasta de cimento Portland.

#### 1.4 HIPÓTESES

- A adição de RB na produção do cimento Portland traz como consequência a redução do consumo de clínquer, sem prejuízo do desempenho mecânico do cimento Portland.
- A adição do RB modifica a microestrutura do material, do ponto de vista de empacotamento e nucleação, promovendo ganho na resistência mecânica da pasta endurecida.

#### 1.5 CONTRIBUIÇÃO ESPERADA

Espera-se que este trabalho contribua para a gestão dos resíduos das pedreiras de basalto e, principalmente, interfira favoravelmente na redução do consumo de clínquer. O consumo de energia para a produção de cimento, devido à incorporação deste material acaba sendo reduzido indiretamente, bem como a geração de CO<sub>2</sub>, pois sabe-se que, para cada quilograma de cimento produzido, tem-se um valor proporcional de 80% de gás carbônico lançado na atmosfera, agravando o problema do aquecimento global. Desta forma, a adição destes minerais ao cimento Portland pode contribuir com a diminuição de custos na produção, reduzindo o volume de clínquer por tonelada de cimento produzido.

Como contribuição para a tecnologia de produção de cimentos, pretende-se verificar a interferência de diferentes teores de adição de finos de basalto nas propriedades mecânicas e na microestrutura da pasta de cimento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BASALTO

#### 2.1.1 Características Gerais

O basalto encontrado na região de Londrina é constituinte de uma jazida localizada na Bacia do Paraná, sendo um tipo de rocha proveniente dos derrames vulcânicos ocorridos há milhões de anos, situada na porção centro-leste da América do Sul. Sua área de ocorrência abrange, principalmente, o centro-sul do Brasil, desde o Estado do Mato Grosso até o Estado do Rio Grande do Sul, perfazendo cerca de 75% de sua distribuição areal. Além do Brasil, ela se estende ao nordeste da Argentina, leste do Paraguai e norte do Uruguai. É uma depressão ovalada, com o eixo maior quase norte-sul, e possui uma área de cerca de 1,5 milhão de km<sup>2</sup>, conforme demonstrado na figura 01.

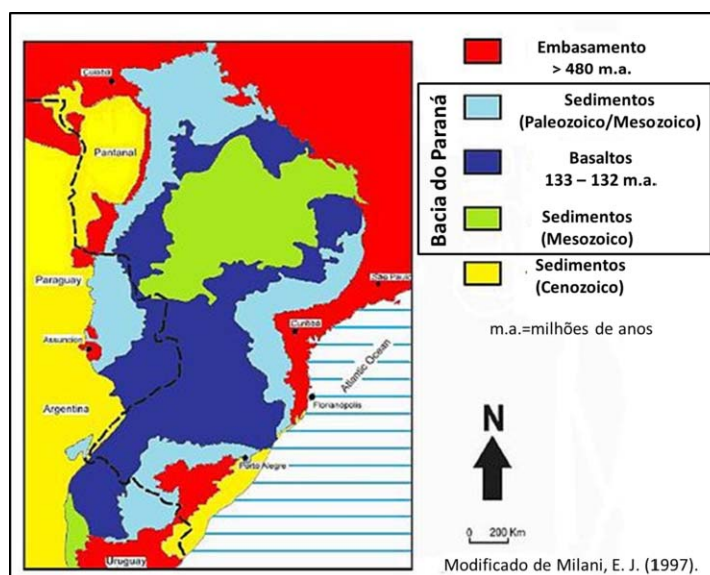
**Figura 01** – Limites geográficos da Bacia do Paraná



**Fonte:** [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:South\\_America\\_satellite\\_plane\\_Bacia\\_do\\_Parana.jpg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:South_America_satellite_plane_Bacia_do_Parana.jpg)  
({{Information |Description={{pt-br|1=Limites geográficos da Bacia Geológica do Paraná}}  
|Source=Modified by owner from Nasa original South America satellite plane.jpg in public domain |Author=GeoPotinga (Date=2008-02-01)

O basalto se desenvolveu durante parte das eras Paleozóica e Mesozóica e seu registro sedimentar compreende rochas depositadas do Período Ordoviciano ao Cretáceo, abrangendo um intervalo de tempo entre 460 e 65 milhões de anos. Sua espessura máxima, superior a 7.000 m na sua porção central, é constituída por rochas sedimentares e ígneas, conforme indica a figura 02.

**Figura 02 – Mapa geológico do Paraná**



**Fonte:** Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná (modificado de Milani, 1997) [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Mapa\\_Geologia\\_Bacia\\_do\\_Paran%C3%A1\\_simples.png](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Mapa_Geologia_Bacia_do_Paran%C3%A1_simples.png)

Os basaltos constituem-se na formação rochosa mais facilmente encontrada na superfície terrestre, a qual apresenta textura de grãos finos, podendo ter material vítreo em pequena quantidade. Verificar-se o percentual de participação de 12,6% de material vítreo na composição encontrada no Paraná.

A tabela 01 apresenta os principais grupos de minerais encontrados no Estado do Paraná (Mineropar- 2001).

**Tabela 01 – Distribuição dos principais grupos de substâncias minerais encontradas no Estado do Paraná**

SUBSTÂNCIAS	USO	PART. % NO VALOR	% N.º DE EMPRESAS	CONTROLES DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL
ÁGUA	Envasada para consumo "in natura"	11,7	1,0	Originalmente, pela ocorrência de fontes naturais; atualmente, por questões de mercado/distribuição (poços profundos).
AREIA	Construção civil, como agregado fino	10,0	18,5	Acumulação fluvial/aluvial, associada às grandes bacias hidrográficas do Estado.
ARGILAS	Cerâmica vermelha, tijolos, telhas e manilhas	2,9	50,2	Acumulações aluvionares em praticamente todas as bacias hidrográficas e depósitos eluviais de solos de alteração de formações específicas (taguá).
BASALTO, DIA BÁSIO, GNAIS SE, MIGMATITO e GRANITO	Brita, para agregado na construção civil.	12,6	11,8	Ocorrência em todo Estado, concentrada nas proximidades dos grandes centros urbanizados; restrições maiores somente no NW do Estado (Arenito Caiuá).
CALCÁRIO	Cimento, cal, rações	14,2	1,6	Faixas de calcário calcítico do Grupo Açungui, na região NE do Estado/RMC.
CALCÁRIO DOLOMÍTICO	Corretivo de solos, cal	17,8	10,3	Faixas de calcário dolomítico do Grupo Açungui, no NE do Estado
XISTO, CARVÃO	Energéticos, para termelétricas e indústrias diversas.	16,4	0,4	São Mateus do Sul: faixa do folhelho Irati; Figueira/Sappema: membro Triunfo da Fm. Rio Bonito.

**Fonte:** Mineropar, 2001

De acordo com a classificação proposta por Lemaitre para as rochas ígneas (Lemaitre apud Korkanç, M. e Tugrul, A. 2005), as rochas com o teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) situado entre 45% e 52% e teor de óxidos de sódio e potássio ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) até 5% são classificadas como basalto, como mostra a tabela 02. O magma que deu origem ao basalto é anidro e, desta forma, é raro encontrar em suas composições minerais hidratados.

**Tabela 02** – Composição de basaltos em óxidos (porcentagem em peso)

	Basalto toleítico	Basalto alcalino
$\text{SiO}_2$	51,38	48,25
$\text{TiO}_2$	1,55	2,21
$\text{Al}_2\text{O}_3$	16,30	16,05
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,23	3,11
$\text{FeO}$	7,41	8,03
$\text{MnO}$	0,17	0,17
$\text{MgO}$	5,60	6,57
$\text{CaO}$	9,75	9,87
$\text{Na}_2\text{O}$	2,53	2,99
$\text{K}_2\text{O}$	0,78	1,03

Fonte: <http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Basalto>, 2012

A rocha basáltica apresenta cor escura, como mostra a figura 03, conhecida tecnicamente como rocha máfica, apresentando alta performance como agregado para os concretos de cimento Portland e betuminoso. Complementam esta qualificação a sua refratariedade, resistência a meios agressivos e resistência à abrasão (Çopuroglu, 2009) e são empregadas na construção de ferrovias, na pavimentação, conservação de rodovias e na construção civil em geral.

**Figura 03** – Amostra de rocha basáltica encontrada na Região Norte do Paraná



Fonte: <http://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2010/05/basalto.jpg>, 2012

O levantamento efetuado por Rüegg e 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 oito tipos diferentes de espécies químicas ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , Fe-total, MgO, CaO,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ).

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.

Estas regiões foram denominadas de “anomalias”, pelo fato de suas características geoquímicas diferirem significativamente da média da bacia como um todo. A tabela 03 apresenta os parâmetros que caracterizam estas diferenças.

**Tabela 03** – Composição geoquímica das rochas basálticas de quatro regiões da Bacia do Paraná (Rüegg; Amaral, 1976).

Região	N	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	MnO	MgO	CaO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$
I	25	54,94	1,44	13,06	9,22	0,15	2,88	5,6	2,89	2,69
II	25	48,96	2,78	13,19	15,38	0,2	5,47	8,29	2,32	1,26
III	54	49,18	3,17	13,34	14,61	0,22	4,63	8,47	2,7	1,4
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. Fonte: Rüegg; Amaral, 1976

Basaltos e diabásios são constituídos principalmente, por plagioclásio e piroxênio, podendo estar presentes a olivina ou o anfibólio. Caso ocorra sílica amorfa na sua composição, poderão ocorrer reações com os álcalis do cimento Portland, com prejuízo da aderência a ligantes betuminosos. (NEVILLE, 2000)

As reservas de rochas basálticas no Paraná são da ordem de 153 milhões de metros cúbicos e sua extração, para a produção de brita, é feita por várias empresas em 86 municípios (Mineropar, 2001). A produção de britas na Bacia do Paraná se dá, predominantemente, pela exploração de jazidas de basalto e diabásio. Alguns produtores também exploram o saibro, conhecido como cascalho, utilizado como revestimento primário e sub-base para pavimentação.

Dentre as litologias exploradas na produção de britas, além do basalto, tem-se o diabásio, o granito, o calcário, o gnaiss e o migmatito, embora existam outras variedades petrográficas utilizadas, consolidados ou granulares, fragmentados naturalmente ou por processo industrial, as quais podem ser oriundas de rochas sedimentares, como arenitos e siltitos, entre outras. (REZENDE, 2009)

Atualmente, aliada à produção de britas, se acentua a produção de agregados miúdos pela moagem de rochas, tanto basálticas, quanto graníticas. Segundo Bauer (1979), o estudo dos agregados é considerado imprescindível no desenvolvimento da tecnologia do concreto, uma vez que estes são os constituintes menos homogêneo dos concreto e das argamassas.

No caso da exploração do calcário, segundo a Mineropar (2001), este é destinado, predominantemente, à produção de cimento Portland, cal, agregados e corretivos agrícolas, o que não ocorre com o basalto.

Segundo Fujimura (1996), originalmente os agregados miúdos obtidos pela moagem de rocha, então denominados finos de britagens, com granulometria inferior a 4,8 milímetros, eram derivados dos processos de perfuração, detonação e britagem de rochas. A sua principal fonte está associada aos finos de pedra, que englobam o material com granulometria inferior a 0,075 milímetros, definido como pó de pedra ou filer pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Nos últimos anos, foram estudadas diversas alternativas para viabilizar, técnica e economicamente, o emprego de agregados miúdos obtidos pela moagem de rochas.

A constituição dos produtos de rocha britada ou moída varia bastante, de acordo com a região, ou mesmo entre minerações situadas na mesma área, pois cada uma detém uma planta de produção própria, cuja classificação granulométrica, realizada por conjuntos de peneiras, depende do produto final pretendido. Assim, os teores e características dos finos de pedreira são muito variáveis.

### 2.1.2 O Resíduo de Basalto

A norma NBR 7211 (2009) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados miúdos e graúdos de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. No seu texto original, define a máxima quantidade de material que passa pela peneira #200 (abertura 75  $\mu\text{m}$ ) em 3% (para concreto submetido a desgaste superficial) e 5% (para concreto protegido do desgaste superficial). Em sua versão mais atual, estes limites foram ampliados para 10% e 12%, respectivamente.

Segundo Cuchierato (2000), diversos autores e pesquisas citam as frações finas produzidas em pedreiras, mas existe um grande conflito entre os termos adotados, geralmente baseados em análises granulométricas. Alguns autores relatam as principais definições sobre o assunto, sem chegarem a uma nomenclatura padrão.

Sbrighi Neto (1975), em seu trabalho sobre a natureza petrográfica da areia britada e a interferência das frações finas nas propriedades do concreto, define “areia britada” como sendo o agregado miúdo resultante da britagem de rochas, e “finos” ou “pó de pedra”, o material com partículas menores que 0,15 mm, comentando que existe uma tendência em se usar o termo filer para definir o material abaixo de 0,075 mm.

O agregado miúdo obtido por meio do processo de cominuição da rocha, é denominado ainda “areia artificial” ou “industrial”, segundo critérios de classificação pela origem e aplicação, respectivamente.

Soares e Mendes (1999) utilizam o termo “finos de pedreira” como o *undersize* da produção de brita, situado abaixo de 4,8 mm, gerado através do processo de cominuição e classificação. Os “finos de pedreira” são, para estes

autores, os materiais granulometricamente situados abaixo da fração 4,8 mm e o “pó de pedra” abaixo de 0,075 mm.

Terra (2000) denomina “pó de pedra” o material situado abaixo de 4,8 mm, que apresenta alta quantidade de material pulverulento (até 20%); e “areia de brita”, aquele mesmo pó de pedra, lavado, com redução significativa de finos para a faixa de 6%.

Cuchierato (2000) adota o termo “pó de pedra” para o material de diâmetro menor que 4,8 mm. Em pedreiras onde o beneficiamento é feito por via úmida, adotam-se dois termos: a “areia de brita” (entre 4,8mm e 0,075 mm), com lavagem e conseqüente retirada da fração mais fina, e os “finos de pedreira”, inferiores a 0,075 mm, que permanecem em suspensão na água e são descartados para bacias de decantação.

Ohashi (2001) apresenta no Projeto ICAR 102, desenvolvido pelo International Center of Aggregate Research - ICAR, ligado à Universidade do Texas, o termo “areia de brita” como a areia produzida a partir da rocha, dentro dos limites normalizados internacionalmente, sendo os “microfinos” o material menor que 0,075 mm.

Consideram-se neste trabalho, como “resíduos de britagens”, os materiais finos provenientes da cominuição das rochas basálticas que apresentam dimensão inferior a 0,075 mm, sendo tratados adiante, neste estudo como RB.

### 2.1.3 A produção de Agregados Basálticos no Paraná

A exploração das jazidas de basalto na Região Norte do Paraná tem provocado a geração e deposição de um grande volume de resíduos na natureza, constituído de frações finas não utilizáveis na construção civil, os quais trazem, estes, constituem passivos ambientais, podendo ocasionar o assoreamento dos rios, comprometimento da vida aquática pelo excesso de turbidez da água, redução da fotossíntese, contaminação dos solos onde estão depositados e poluição do ar.

Uma solução para a minimização destes problemas é a utilização destes resíduos como adições junto à construção civil. Atualmente, as usinas mineradoras têm utilizado pouquíssimo volume de RB e a indústria da construção civil não apresenta índices consideráveis de incorporação destes resíduos ao processo de produção de concretos. Segundo dados da mineradora estudada, a

quase totalidade deste material é incorporada a uma usina de asfalto que fica localizada na própria pedreira, evitando, desta forma, o acúmulo destes resíduos em montes, muito comum de ocorrer nas pedreiras.

Frente à crescente importância da questão ambiental, muitos países vêm criando medidas, sob respaldo legal, a fim de atribuírem às indústrias a responsabilidade pela geração e descarte dos rejeitos gerados em seus processos. Para o desenvolvimento sustentável, a evolução da ciência e tecnologia deve ser destinada à busca de compatibilidade entre a produção e a proteção do meio ambiente, colocando o manejo adequado de detritos industriais como uma importante meta. Um exemplo é a Resolução 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2005).

O manejo adequado dos resíduos representa um dos mais relevantes temas da atualidade e, neste sentido, busca-se cada vez mais o aproveitamento eficiente dos materiais minerados. Para tanto, os estudos de geologia dos depósitos minerais e de propriedades físicas e químicas destes materiais são fundamentais.

Um outro aspecto a ser considerado na questão da produção de agregados se refere à logística da disponibilização dos produtos. A comercialização das britas geralmente é feita na própria região produtora, pois os custos com frete oneram o material.

No Paraná a produção de agregados e o número de empresas exploradoras de jazidas de rochas basálticas vêm crescendo, segundo dados da MINEROPAR, muito embora, em Londrina, este crescimento não tenha sido constatado, provavelmente em razão da não conformidade às exigências ambientais impostas pelos órgãos competentes, conforme pode ser observado na Tabela 04.

**Tabela 04** – Número de empresas de extração de minerais no Paraná e em Londrina.

Número de Empresas de Extração de Minerais no Paraná em 2005-2010		2005	2006	2007	2008	2009	2010
Paraná	Empresas de Extração de Minerais	40	43	42	43	41	43
Londrina	Empresas de Extração de Minerais	12	9	13	8	9	8

Fonte: <http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=183>, 2012

O número de empregos na indústria de extração de minerais também apresenta um crescimento considerável, e Londrina tem acompanhado este crescimento no mesmo ritmo do estado, conforme demonstrado na Tabela 05.

**Tabela 05** – Número de empregos na indústria de Extração de Minerais no Paraná, e em Londrina.

Número de Empregos na Indústria de Extração de Minerais no Paraná e em Londrina		Município 2005-2010					
Localidade	Valor	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Estado do Paraná	Empregos Indústria de Extração de Minerais	411	537	538	537	522	630
Londrina	Empregos Indústria de Extração de Minerais	8	54	51	57	70	77

Fonte: MTE – BDEweb/IPARDES, 2012

O valor da produção mineral do Estado do Paraná, em 2010, foi de R\$ 480,20 milhões, segundo dados da MINEROPAR (2012) apresentados na tabela 06. A arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração Mineral - CFEM no mesmo ano foi de R\$ 7,21 milhões, sendo R\$ 4,56 milhões destinados aos municípios mineradores, R\$ 1,61 milhão ao Estado e o restante, R\$ 1,04 milhão, destinado, principalmente, ao Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM.

De 2004 a 2010, o ritmo de crescimento do valor da produção mineral só reduziu na passagem de 2008/2009, em função da crise econômica que atingiu todo o país, mas em 2010 retomou a tendência geral de crescimento.

**Tabela 06** – Valor da operação, arrecadação e repasse da compensação financeira pela exploração mineral – CFEM no Paraná, 2004 a 2010 – em milhões de R\$

**FONTE:** DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

**NOTA:** – (1) Equivalente ao valor da produção mineral comercializada incluindo impostos (ICMS, PIS, COFINS) mais transporte e seguro.

(2) Diferenças no resultado do somatório da arrecadação da CFEM (total e por substância) decorrem das atualizações e correções promovidas no período.

(3) MME – Ministério das Minas e Energia e FNDCT – Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

## 2.2 CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL

A descoberta do cimento Portland revolucionou, de certa forma, a indústria da construção civil. As estruturas em concreto armado passaram a predominar nos sistemas construtivos, possibilitando que fossem vencidas as limitações características dos sistemas utilizados até então.

As duas grandes guerras deixaram um rastro de demolição, o que intensificou a busca por alternativas que empregassem novos sistemas construtivos.

As megalópoles são edificadas à base de muito concreto armado, e esse novo imperialismo tem, no poder bélico dos EUA, o seu líder, que congrega múltiplos Estados e soberanias. A "Pax Americana" é mantida sob dupla internacionalização: a da produção, pois a força de trabalho permanece diluída pelas soberanias estatais - e a do Estado, que é regida pelas imposições da economia globalizada e submissa ao consenso internacional, estruturado hierarquicamente. (GARCIA, 2010)

Moreira (2003) considera que o período pós-guerra, até meados dos anos 70, foi uma fase relevante de expansão econômica e de mudanças estruturais na cadeia produtiva das economias capitalistas, tendo sido liderada pelo setor industrial metal-mecânico, com bens de capital e de consumo duráveis e, por outro lado, com mais vigor, pela indústria petroquímica. O Brasil conheceu o grande impulso capitalista, tendo como sustentação o Estado, as empresas transnacionais e as nacionais, ao estruturar uma rápida matriz industrial em seu território, favorecendo a instalação do setor produtivo em vários segmentos: químico-petroquímico, mecânico, de transporte, madeireira, papel e celulose e indústria de minerais não-metálicos.

A história da internacionalização faz parte da cena econômica mundial desde o Século XIX, quando empresas inglesas passaram a explorar ferrovias em territórios inóspitos das Américas e da África, e conseguiram esta posição por terem sido pioneiras na Revolução Industrial, com a descoberta do motor a vapor e a utilização do aço e do ferro em escala industrial.

Gaspar (1999) destaca que a industrialização ganhou novo impulso com o emprego da eletricidade, do motor à combustão interna, da química orgânica, dos materiais sintéticos, da manufatura de precisão, do aço e do petróleo em escala industrial, caracterizando o segundo grande ciclo de crescimento da indústria, com

nova estrutura produtiva consolidada e generalizada. Suas características principais foram:

1. Rápido e prolongado crescimento internacional da produção e da produtividade;
2. Liderança do setor industrial;
3. Destaque àqueles setores ligados à produção em massa de bens de consumo duráveis (automóveis e eletrodomésticos), aos bens de capital e à química, em particular a petroquímica;
4. O subsistema de filiais das grandes empresas oligopólicas se impõe em nível mundial, expressando o processo de internacionalização produtiva;
5. O ritmo de crescimento do comércio internacional se intensifica, acima do crescimento da produção industrial;
6. O mercado interno dos principais países capitalistas assegura o crescimento econômico;
7. Cresce a participação do emprego industrial e do emprego nos serviços, causando o fenômeno de intensificação do êxodo rural;
8. Acelera-se o processo de substituição de matrizes energéticas, com o abandono das fontes sólidas (carvão), as quais vão sendo substituídas pelo petróleo (MATTOSO apud GASPAR, 1999, p. 61).
9. Não se constata, neste período, a preocupação com a política ambiental de preservação de reservas.

Santi e Sevá Filho (2004) se referem ao uso generalizado de combustíveis nos fornos rotativos que compõem o processo de fabricação do cimento, destacando as inúmeras possibilidades de combinação destes

combustíveis, conhecidas como *blends*. Questionam o fato de se incinerarem uma série de resíduos industriais nos fornos de clínquer, considerando que os mesmos não foram projetados e nem licenciados especificamente para tal.

Desta forma, é perceptível que, no processo de industrialização da economia brasileira em geral, e a indústria do cimento faz parte desta classe, houve graves deficiências no que se refere às tecnologias de controle de emissões tóxicas, bem como, políticas de tratamento, reciclagem e reprocessamento durante os processos produtivos. Faltaram cuidados e elementos tecnológicos relacionados à preservação da natureza e do meio ambiente, bem como à racionalização e adequação das matrizes energéticas.

Outro aspecto importante, segundo Moreira (2003), foi a permissão para que, no Brasil, as atividades econômicas se concentrassem nas áreas urbanas, mais acentuadamente aquelas atividades ligadas ao setor industrial, dando origem a graves problemas urbanos e ambientais, referentes à inadequação residencial, insalubridade, desastres ecológicos, ocupação descontrolada, especulação imobiliária e degradação do solo, entre outros impactos.

De acordo com Santi e Sevá Filho (2004), foi na fase posterior aos denominados “choques do petróleo”, nos anos 70, que o Governo Federal da União intensificou a política energética para substituição do óleo cru importado, baseada nos seguintes itens:

- (a) incentivar a redução e/ou não uso de derivados de petróleo por meio de uma política de elevação de preços, particularmente, do óleo combustível;
- (b) criar subsídios e incentivos a combustíveis similares aos óleos pesados;
- (c) conceder subsídios ao uso de energia elétrica para os sistemas de geração de calor e vapor.

No final da década de 70, a indústria de cimento usava óleo combustível para atender 93% de suas necessidades. Posteriormente, intensificou-se o uso dos carvões mineral e vegetal, chegando-se a uma taxa de 94,6% de substituição do óleo combustível em 1985. Somente neste período, a indústria de cimento passou a adotar medidas de conservação de energia, chegando a uma redução no consumo da ordem de 20%, entre 1980 e 1995 (SANTI; SEVÁ FILHO, 2004).

Com a evolução da consciência ambiental, em 1987, foi publicado o “Nosso Futuro Comum”, com patrocínio da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada na Assembléia Geral das Nações Unidas, respondendo positivamente à proposta do desenvolvimento sustentável, conceito introduzido em 1983, como proposta do Conselho de Administração do PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), conhecida mundialmente como “Relatório Brundtland”, em homenagem à Senhora Gro Harlem Brundtland, Presidente da referida comissão e Ex-Ministra da Noruega (MOREIRA, 2003).

Um dos conceitos que se popularizou desde então, foi o de desenvolvimento sustentável.

Para haver desenvolvimento sustentável é necessário atender as necessidades da geração atual, sem colocar em perigo a capacidade das futuras de satisfazer as suas. Perpassa o atendimento das demandas sociais emergentes no conceito global, considerando-se o pressuposto de manejo eficiente dos ecossistemas, tanto sob os aspectos do meio físico como biótico.

Nesse contexto, se encerra a responsabilidade dos compromissos do indivíduo e da coletividade com as conseqüências da degradação ambiental, em três dimensões distintas: no tempo, com uma visão que se prolonga pelo futuro; no espaço cobrindo todo o planeta como área de interesse de cada indivíduo e, no foco, a responsabilidade é envolvente, abrigando todos os seres, construindo uma nova ética complexa e plural (MOREIRA, 2003, p. 9).

Em relação a este aspecto, a indústria da construção civil vem, progressivamente, absorvendo e implantando novos conceitos e práticas, por estar diretamente envolvida com o meio ambiente. Muito embora sejam incontestáveis os benefícios trazidos por estes avanços, vinha se acentuando no setor, a exploração das reservas naturais de fontes não renováveis de matérias primas, chegando-se a um período de intensa degradação do meio ambiente.

A indústria de cimento, em particular, responsável pela emissão de grande volume de dióxido de carbono no processo de clínquerização, começou a pensar na substituição da matriz energética, buscando, através do uso da biomassa, corresponder mais diretamente aos princípios da sustentabilidade.

John (2000) faz referência ao emprego principal do cimento, no caso particular da produção do concreto, destacando ainda que este não somente se compõe de cimento Portland, mas que, em torno de 70% de sua constituição, corresponde a agregados, o que torna relevante a preocupação com a extração e

exploração das jazidas de rochas, particularmente graníticas e basálticas, registra que cerca de 210 milhões de toneladas de agregados são consumidos anualmente no Brasil, somente na produção de concretos e argamassas.

Diante deste cenário, em que fontes de recursos naturais não renováveis são consumidas largamente, se intensifica a preocupação com o meio ambiente nos mais diversos níveis da sociedade brasileira.

A legislação que dispõe sobre o meio ambiente e, conseqüentemente, sobre o desenvolvimento sustentável, é a Resolução CONAMA nº 001/86 (de 23.01.86, D.O.U. de 17.02.86):

Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da AIA como um dos instrumentos da PNMA. Foi através dessa norma legal que a Avaliação de Impacto Ambiental – AIA, de fato, foi inserida no quadro conceitual e institucional da Política Nacional do Meio Ambiente - PNMA, conforme preconiza o inciso III do art. 9º da Lei nº 6.938/81 (que estabeleceu a PNMA) (MOREIRA, 2003, p. 52).

A Resolução citada estabelece as seis definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da AIA - Avaliação de Impacto Ambiental, como um dos instrumentos da PNMA - Política Nacional do Meio Ambiente, bem como, a exigência do EIA/RIMA para o licenciamento das atividades constantes no seu Art. 2º (adiante transcrito).

O Artigo 1º desta Resolução considera impacto ambiental como sendo:

[...] qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, diretamente ou indiretamente, afetam: I – a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II – as atividades sociais e econômicas; III – a biota; IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e, V – a qualidade dos recursos ambientais. [...] O artigo 2º relaciona as atividades modificadoras do meio ambiente cujo licenciamento depende da elaboração de Estudo de Impacto Ambiental - EIA e respectivo Relatório de Impacto Ambiental-RIMA a serem submetidos à aprovação do órgão estadual competente, e do IBAMA, em caráter supletivo. A relação das atividades e empreendimentos foi alterada pelo Anexo I da Res. CONAMA no 237/97, onde constam: Indústrias: Metalúrgica; de Material Elétrico, Eletrônicos e Comunicações; de Material de Transporte; de Madeira; de Papel e Celulose; da Borracha; de Couros e Peles; Química; de Produtos de Matéria Plástica; Têxtil, de Vestuário, Calçados e Artefatos de Tecidos; de Produtos Alimentares e Bebidas; de Fumo; Diversas (usinas de concreto e de asfalto) (MOREIRA, 2003, p. 52-53).

Desta forma, a busca e identificação de alternativas voltadas para a preservação ambiental tem se tornado uma diretriz relevante no desenvolvimento de pesquisas e na evolução industrial. Diante destes relatos, a proposta deste trabalho vem favorecer esta nova visão, que propõe o avanço tecnológico dos processos industriais associado à preservação ambiental e à qualidade de vida da população.

A pesquisa de novas alternativas, que permitam a destinação adequada de resíduos, tem se tornado o foco principal de vários grupos de estudo, os quais buscam formas de aplicação imediata do resíduo de britagem e a sua utilização em bases de pavimentos, possibilitando a redução do consumo de cimento. Exemplificando, a substituição de um teor de 5% de cimento por RB na execução de bases de brita graduada tratada com cimento – BGTC, representa uma economia considerável de material cimentante, uma vez que o consumo de brita graduada aplicada na execução de 10 km de pista dupla, em uma rodovia, é da ordem de 150 mil toneladas. Considerando que o consumo de cimento é da ordem de 4,5% da massa de brita graduada, este seria de 6.750 toneladas. Se for realizada a substituição de 5% da massa de cimento por RB, isto representaria uma redução de 337 toneladas de cimento, o que garantiria uma economia de 168 mil reais, considerando o preço do saco de cimento de R\$ 25,00.

## 2.3 CIMENTO *PORTLAND*

### 2.3.1 Histórico do Cimento *Portland*

O uso de materiais cimentícios remonta à antiguidade, o que pode ser constatado através de registros de diversas civilizações, como a egípcia (3.000 a 2.500 a.C), que produzia argamassas de gipsita e de cal, as quais foram empregadas na construção das pirâmides.

De acordo com Lopes (1998), a descoberta dos aglomerantes pelo homem primitivo pode ter ocorrido devido à proximidade das fogueiras junto às jazidas de calcário e gesso. O calor desprendido provocava a descarbonatação das pedras, resultando em um pó, o qual, hidratado pela umidade, se noturna convertia novamente em pedra.

Na civilização romana (300 a.C a 476 d.C), há registros de construções de muros em concreto (areia e cal ou cal e cinzas vulcânicas), sendo

que, por volta do Século II a.C, este começou a ser usado em edificações em Roma (Via Ápia, Coliseu, Pantheon e aquedutos).

O concreto, como hoje é conhecido, trata-se de uma mistura de cimento e agregados, utilizando, além destes componentes, resíduos industriais e aditivos químicos. Na fabricação do cimento podem ser utilizadas adições minerais que venham contribuir para o seu melhor desempenho mecânico e maior durabilidade. (Mehta, 1999).

No decorrer da história, vários materiais cimentícios foram utilizados. Os gregos empregavam cinzas vulcânicas da Ilha de Santorim e os romanos usavam uma terra existente na Baía de Nápoles, chamada pozolana, nome devido ao fato de ter sido encontrada pela primeira vez nos arredores de Pozzuoli, junto ao Vesúvio. Destas experiências greco-romanas nasceram os cimentos hoje conhecidos como cimentos pozolânicos.

A primeira tentativa de explicar a transformação de matérias primas em materiais cimentícios foi de Vitruvius, no Século V a.C. Porém, os primeiros trabalhos científicos sobre o assunto tiveram início no Século XVIII d.C, período considerado áureo para a ciência. (FRANÇA, 2002).

O engenheiro inglês John Smeaton descobriu, em 1756, por meio de estudo com materiais, características de hidráulidade em certas cales. O mesmo identificou a possibilidade de se obter um material cimentício de qualidade, apresentando desempenho mecânico e durabilidade satisfatórios, com características semelhantes às melhores pedras encontradas na ilha britânica de Portland, razão da origem do nome cimento Portland. Porém, somente em 1924, foi patenteado o produto denominado cimento Portland por Joseph Aspdin.

L.J. Vicat, engenheiro francês responsável pelos princípios racionais da fabricação da cal hidráulica, desenvolveu estudos utilizando calcário e argila e verificou que a presença de magnésio, alumina e óxido férrico favorecia as propriedades hidráulicas do cimento. (SÁ, 2009)

O cimento Portland, é um aglomerante hidráulico obtido através da clinquerização de calcário e argila, com adição de minério de ferro como fundente, até a fusão incipiente, e posterior adição do gesso (gipsita), podendo ainda haver a adição de outros materiais como escórias, pozolanas e materiais carbonáticos (FRANÇA, 2002).

Os cimentos são constituídos, basicamente, de silicatos e aluminatos de cálcio. Dentre os compostos do cimento anidro estão o silicato tricálcico ( $C_3S$ ), responsável pela resistência inicial dos cimentos e pela liberação de grande parte do calor de hidratação devido à quebra do tetraedro de  $SiO_4$  e formação de redes cristalinas -Ca-O-Si-O-; O silicato dicálcico ( $C_2S$ ), responsável pela resistência do cimento em idades mais avançadas, após quatro semanas. Ambas são responsáveis pela formação de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), responsáveis pelas principais propriedades do cimento Portland.

A fabricação do cimento Portland é constituída de cinco etapas, sendo a primeira, o preparo da matéria-prima, mais especificamente calcário e argila, quando a rocha calcária é britada até dimensões da ordem de 25 a 40 mm. A segunda etapa consiste na obtenção do “cru” ou farinha, a qual é pré-homogeneizada numa composição ideal, com controle rigoroso de qualidade. A farinha é pré-aquecida a  $900^\circ C$ , se deslocando ao longo do forno até atingir a região do maçarico, onde a temperatura chega a  $1450^\circ C$ , seguida de resfriamento brusco. Posteriormente, ocorre a moagem para obtenção de partículas com dimensões inferiores a  $200\mu$ . Na etapa seguinte, é fabricado o cimento propriamente dito, a partir da adição de gipsita em teores de 3 a 5%, com o objetivo de controlar a pega. A gipsita atualmente é substituída por fosfogesso originário da região de Cubatão, por questões de logística.

A quinta e última etapa consiste no encaminhamento do produto, por vias pneumáticas ou mecânicas, para o armazenamento e posterior destinação ao consumo, sendo comercializado a granel ou em sacos de papel *craft* de 25 e/ou 50 kg.

O cimento Portland, em se tratando de um aglomerante hidráulico, cujo endurecimento ocorre por meio de reações topo-químicas de produtos de hidratação, resulta na formação de um produto final estável inclusive em meio aquoso. (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

Tanto as características físicas do material, quanto a sua composição química, interferem no processo de hidratação, razão pela qual existe uma diversidade de tipos de cimento Portland, com características específicas.

Por outro lado, a utilização de adições minerais ativas à matéria prima, ou a sua incorporação ao concreto, apresenta-se como uma forma de evitar problemas de durabilidade, fixando a cal livre e reduzindo a susceptibilidade a

agentes agressivos, com a conseqüente minimização do calor de hidratação, efeito negativo ao concreto.

Como a velocidade de liberação do calor de hidratação pelo cimento sofre influências de sua finura e composição química, sendo os compostos  $C_3S$  e  $C_3A$  os que se hidratam e liberam calor mais rapidamente, em muitos casos é interessante a utilização de adições minerais conjuntamente com os cimentos que apresentam alta concentração destes compostos. O  $C_2S$ , por sua vez, apresenta uma hidratação mais lenta, o que faz com que os cimentos que apresentam concentração elevada deste composto se caracterizem pela baixa liberação de calor. (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997).

A tabela 07 apresenta dados a respeito da produção e consumo de cimento no Paraná e no Brasil até o ano de 2010.

**Tabela 07** – Produção e consumo de Cimento no Paraná e no Brasil.

Produção e Consumo Aparente de Cimento no Paraná e no Brasil - 2005 a 2010 - em milhões de toneladas						
Ano	2005	2006	2007	2008	2009	2010
PRODUÇÃO DE CIMENTO NO BRASIL	38,705	41,895	46,551	51,97	51,747	59,117
CONSUMO APARENTE DE CIMENTO NO BRASIL	37,666	41,027	45,062	51,571	51,892	60,008
PRODUÇÃO DE CIMENTO NO PARANÁ	4,018	3,923	4,548	5,313	5,332	5,685
CONSUMO APARENTE DE CIMENTO NO PARANÁ	2,226	2,204	2,381	3,001	3,092	3,749

**Fonte:** SNIC – Relatório anual de 2010 e outros.

O crescimento significativo de 52,7% na produção de cimento no Brasil remarca a importância da utilização do material e, por conseqüência, os impactos relacionados com sua produção.

### 2.3.2 Tipos de Cimento *Portland*

Existem diferentes tipos de cimento Portland no Brasil, assim denominados:

- Cimento Portland Comum (CP I) → constituído de cerca de 95% de clínquer e gipsita e 5% de filer calcário, o qual, hoje raramente é empregado devido às necessidades crescentes de redução de custos e ao domínio mais abrangente do comportamento físico-químico das adições.

- Cimento Portland Composto (CP II) → existem três tipos de cimento composto, ou sejam, o CP II-E, o CP II-Z e o CP II-F. O CP II-E é produzido com adição de escória, acarretando menor resistência inicial, baixo calor de hidratação, tempo de início de pega prolongado e maior durabilidade em presença de meios agressivos (Pena, 2004). O CP II-Z é obtido com a adição de material pozolânico, o que acarreta uma pega mais lenta, redução na resistência inicial e no calor de hidratação, garantindo maior resistência ao ataque de sulfatos e consequente aumento da durabilidade dos concretos com ele produzidos. O CP II-F é produzido com maiores teores de filer calcário.

- Cimento Portland de Alto Forno (CP III) → este tipo de cimento tem como características apresentar menor calor de hidratação, o que garante redução no índice de fissuras no concreto e, quando exposto a meios e agentes agressivos, principalmente água do mar e águas residuais, apresenta uma boa durabilidade.

- Cimento Portland Pozolânico (CP IV) → este cimento é obtido com teores de pozolana superiores a 14%, sendo indicado para obras hidráulicas, como barragens, canais e reservatórios. Em presença de agregados potencialmente reativos e estruturas em contato com agentes agressivos, como cloretos e sulfatos, apresentam bom desempenho e durabilidade. Apresentam vantagens, tais como, melhora da plasticidade do concreto, menor calor de hidratação, aumento da resistência ao ataque químico, estabilidade de volume e inibição da reação álcali-agregado. O aspecto desfavorável deste tipo de cimento é a pega mais lenta.

- Cimento Portland ARI (CP V) → É um tipo de cimento que desenvolve alta resistência inicial, em função do elevado índice de finura. Apresenta em sua composição cerca de 95% de cimento CP-I e até 5% de filer calcário. A rapidez verificada no processo de endurecimento do cimento ARI, garante que, aos 3 dias de idade o ARI alcance valores da resistência mecânica à compressão superiores a 30,0 MPa, valores estes alcançados pelos demais cimentos de classe 32 em idades superiores a 14 dias. Normalmente são verificados valores da resistência aos 28 dias superiores a 50,0 MPa.

## 2.4 ADIÇÕES MINERAIS

Adições minerais são materiais incorporados aos cimentos ou aos concretos e argamassas, em quantidades variáveis, que podem interferir no desempenho da pasta e melhorar algumas de suas propriedades. Além disso, as adições minerais são, em geral, subprodutos industriais, o que faz com que seu custo seja reduzido quando comparado ao custo do clínquer do cimento Portland.

Podem ser utilizadas em substituição parcial ao cimento ou como adição, em teores que variam em função das características de cada material. (SILVEIRA, 1996).

Existem referências na literatura por parte de vários pesquisadores indicando valores usuais de substituição da ordem de 5 a 20% para microsilica, 55 a 70% para escória de alto forno, 25% a 60% para cinzas volantes, 15 a 50% para cinza de casca de arroz e 10 a 50% para filer calcário (MORAES, 2001; HOPPE FILHO, 2002).

Aspectos como a redução do calor de hidratação, o incremento de resistência mecânica, a melhoria na coesão, a diminuição da exsudação, a redução da permeabilidade, o aumento da resistência química e o aumento da durabilidade, são conseqüências do tipo de adição e do teor de dosagem empregados. Em função da alta superfície específica destas adições, percebe-se um prejuízo na trabalhabilidade, decorrente da redução da fluidez, a qual pode ser melhorada mediante a incorporação de aditivos.

As pesquisas realizadas nas últimas décadas têm revelado um desempenho favorável de aditivos químicos e adições minerais nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto. O refinamento dos poros, decorrente das adições minerais, se reflete, conseqüentemente, na porosidade da pasta, tornando o concreto menos suscetível à penetração de agentes agressivos.

Muito embora se tenha conhecimento de vários efeitos benéficos nas propriedades dos concretos, obtidos com as adições minerais, o desconhecimento de algumas propriedades importantes destas adições pode trazer sérios prejuízos às estruturas de concreto armado. Para se atingir a vida útil prevista para uma determinada estrutura de concreto com adições minerais, inicialmente deve ser feito um estudo detalhado de dosagem, definindo o teor máximo da adição mineral e dos aditivos químicos para os parâmetros estabelecidos, sejam eles de

resistividade elétrica, de penetração de cloretos ou de resistência à carbonatação, visando explorar ao máximo as características de uma determinada adição, de forma a garantir desempenho mecânico adequado e durabilidade satisfatória destes concretos.

Como os teores de silicatos e aluminatos presentes no cimento são insuficientes para consumirem todo o hidróxido de cálcio liberado, as adições minerais desempenham este papel de formação complementar de C-S-H, reduzindo o teor de cal livre e, conseqüentemente o teor de hidróxido de cálcio. Quando um determinado material é usado como adição ou substituição parcial do cimento Portland, o hidróxido de cálcio e a gipsita presentes no cimento aceleram sua hidratação (Dal Molin, 2005). No caso específico do fíler calcário, este atua, principalmente, através do efeito físico microfíler e como ponto de nucleação na fase de hidratação (DAL MOLIN, 2005).

Segundo Castro (2003), é necessário conhecer melhor as características de um determinado material a ser empregado como adição ao cimento, para se compreender as reações e alterações por ele causadas junto à pasta, com o objetivo de melhorar algumas de suas propriedades. Contudo, diferenças nas características físicas e químicas desses materiais, conseqüências da diversidade de tipos e da origem destas adições, dificultam a escolha da melhor adição mineral e do teor adequado a ser empregado.

#### 2.4.1 Dados Gerais

O uso de algumas adições minerais, traz ainda grande benefício à sociedade, por se tratar da destinação de resíduos de processos industriais. Outro aspecto favorável, é a redução do volume de clínquer na fabricação do cimento, o que traz como conseqüência a redução do consumo de energia e do impacto ambiental, ao se substituir um percentual de matéria prima, submetida a clínquerização, por adições minerais.

Dentre estas adições estão as pozolanas, assim definidas por Mehta e Monteiro (1994, p. 217):

Material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante mas, numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes. (ABNT NBR 12653, 1992).

As pozolanas podem ser naturais, de origem vulcânica e geralmente ácidas, ou de origem sedimentar; podem também ser artificiais, provenientes do tratamento térmico de certos materiais, ou subprodutos industriais com atividade pozolânica (NBR 5736/91).

Aitcin (2000) cita que a maioria das pozolanas tem uma característica em comum: elas contêm alguma forma de sílica vítrea reativa que, na presença de água, pode combinar-se com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , à temperatura ambiente, para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

O teor de hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  presentes no cimento Portland, pouco contribui para a resistência da pasta de cimento hidratada e é a fase mais suscetível a ataques de agentes químicos, sendo facilmente lixiviada. Quando isto ocorre, resulta em um aumento da porosidade da matriz da pasta de cimento, fazendo com que o concreto se torne mais vulnerável à penetração de agentes agressivos. A adição das pozolanas, as quais são ricas em sílica e alumina, garante a fixação da cal livre, resultando em silicato e aluminato de cálcio (DAL MOLIN, 2005).

Por se tratar de um material extremamente fino, a pozolana proporciona um efeito físico, através da colmatação dos poros, diminuindo o volume de vazios; e um efeito químico, pela produção de C-S-H secundário. Contribui assim, para uma menor porosidade da pasta, o que permite ganhos de resistência mecânica e proporciona um concreto com baixa permeabilidade, garantindo uma proteção à estrutura frente a agentes agressivos, que promovem a deterioração do concreto (DAL RI, 2002).

O uso destas adições tem proporcionado concretos cada vez mais resistentes e duráveis, melhorando as propriedades já existentes no concreto tradicional.

Quando se substitui parte do cimento Portland por cinzas volantes, cinza de casca de arroz, escória de alto-forno, sílica ativa, cada uma destas adições minerais atua de modo distinto, de acordo com sua granulometria e atividade química ou física. O desenvolvimento destas reações proporciona a formação de

compostos hidratados mais homogêneos e induz à diminuição dos teores de hidróxido de cálcio na solução dos poros do concreto, originando uma pasta mais densa, em função da substituição dos poros grandes por menores. Por efeito físico, a incorporação de partículas menores propicia um maior empacotamento dos componentes do cimento e diminui o efeito parede da zona de transição. (Vide figura 04).

**Figura 04** – Empacotamento de partículas constituintes do cimento.



Figura 1 - Falha de empacotamento

Figura 2 - Empacotamento adequado

**Fonte:** Mehta e Monteiro (1994)

De acordo com o tipo de adição mineral e dosagem, diversas características importantes do concreto podem ser obtidas, tais como:

- Redução do calor de hidratação;
- Incremento de resistência em idades avançadas;
- Melhoraria da coesão;
- Diminuição da exsudação;
- Melhoria da fluidez do concreto;
- Melhoria da resistência na zona de transição entre a pasta e o agregado;
- Redução da permeabilidade;
- Influência na resistividade elétrica;
- Aumento da resistência química.

#### 2.4.2 Tipos de Adições

Quanto a sua origem, as adições podem ser, naturais, vulcânicas ou sedimentares; de origem artificial, obtida por processos de produção envolvendo tratamento térmico ou como subprodutos resultantes de processos industriais, sendo as mais comuns: sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno, cinza de casca de arroz, filer calcário e cal hidratada.

#### 2.4.2.1 Sílica ativa

A sílica ativa, também conhecida como microsilica, é mais utilizada em concreto de alto desempenho. Sua contribuição garante uma alta reatividade, induzindo a um aumento nas resistências mecânicas iniciais e finais; diminuição da taxa de absorção e aumento da resistência capilar.

Esta pozolana, constituída por partículas esféricas de dimensões de 15 a 0,3 micrometros ou mais, em contato com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento, resulta na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Sua ação pozolânica e microfíler provoca redução considerável do tamanho dos poros e, ocasionalmente, também a sua obstrução, reduzindo a permeabilidade (SANCHEZ, 1997).

A adição de altos teores de sílica ativa, todavia, é desvantajosa no que se refere à carbonatação, uma vez que o consumo de hidróxido de cálcio na reação pozolânica é bastante elevado. Esse alto consumo de hidróxido de cálcio diminui a quantidade de produtos carbonatáveis e redução do pH da água dos poros, aumentando as taxas de carbonatação, como descreve Isaia (1995).

Na conclusão de seus estudos sobre a corrosão das armaduras em concretos com adições de sílica ativa, Vieira (2003) afirma que as taxas de corrosão não se alteram após comparação de concretos com 10% de adição de sílica com concretos de referência, mesmo ocorrendo uma ligeira diminuição do pH e um consequente aumento da profundidade de carbonatação.

O uso da microsilica também interfere no desempenho do concreto fresco, reduzindo a exsudação e aumentando a coesão. Seus efeitos benéficos não se limitam à reação pozolânica, pois o efeito físico das partículas finas posicionadas na interface agregado-pasta, que é a região mais porosa do concreto, contribui com a colmatação dos poros (NEVILLE, 1997).

Segundo Isaia (1995), o emprego da sílica ativa no concreto traz acréscimos médios de resistência mecânica, da ordem de 25 a 45%. No caso da absorção de água, para teores de adições entre 10 e 20%, ocorrem decréscimos entre 45 e 68%, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Embora haja um ganho de resistência com o emprego da sílica ativa, a redução da absorção de água é mais significativa para os teores mencionados, o que torna o uso deste tipo de pozolana mais relevante no aspecto da durabilidade, do que no da

resistência, já que a sílica ativa contribui efetivamente para a modificação da estrutura dos poros e a diminuição da conectividade entre eles, o que reflete diretamente na diminuição da permeabilidade do concreto.

#### 2.4.2.2 Cinza volante

Cinza volante – esta pozolana, originária da queima de carvão mineral nas termoelétricas, melhora a trabalhabilidade e a coesão do concreto fresco. Conforme Venquiaruto (2002), do ponto de vista físico, as cinzas volantes são esféricas e de grande finura. A adição da cinza volante traz vantagens significativas ao concreto fresco, pois melhora a trabalhabilidade e a coesão, diminuindo a exsudação e a segregação. Isto facilita as operações de transporte, lançamento e adensamento, uma vez que sua incorporação é responsável pelo retardamento do tempo de pega, bem como pela redução do calor de hidratação e da permeabilidade, trazendo como consequência, o aumento da durabilidade.

Segundo Sperb (2003), quanto à resistência à compressão, os resultados obtidos com concretos contendo cinza volante dependem do teor empregado e da cristalinidade da mesma, mas costumam apresentar resistências iniciais iguais ou inferiores a concretos contendo apenas cimento, ao passo que nas idades superiores aos 28 dias apresentam resistências iguais ou superiores, havendo presença suficiente de hidróxido de cálcio para a continuidade das reações pozolânicas.

Ao desenvolver estudo com cinza volante, utilizando o teor de substituição do cimento de 50%, Frizzo (2001) verificou decréscimos na resistência à compressão aos 91 dias, em relação ao concreto de referência, para a relação água/aglomerante de 0,35 a 0,65. Ao observar os parâmetros de durabilidade, verificou uma redução considerável nos coeficientes de permeabilidade, sendo que o mesmo ocorreu com os coeficientes de absorção capilar, quando comparados com os respectivos valores do concreto de referência.

Desta forma, dentre as vantagens da adição de cinza volante aos concretos, se destacam a redução da permeabilidade e, conseqüentemente, o aumento da durabilidade (WINCK, 2002).

#### 2.4.2.3 Escória de alto forno

Escória de alto forno – Este tipo de material aglomerante é um subproduto industrial, do processo de obtenção do ferro fundido. O minério de ferro é constituído por uma mistura de óxidos de ferro com outras substâncias ricas em cálcio, silício e alumínio e, durante este processo, o minério de ferro, coque, geralmente calcário, é lançado na parte superior do alto forno. Esta mistura vai descendo lentamente, aquecendo até a zona de fusão, onde atinge temperaturas da ordem de 1450°C. No alto forno depositam-se duas substâncias com densidades diferentes, o ferro fundido e um material mais leve designado escória (COUTINHO,1988).

Hasparyk et al (2002) apud Vagheti (2005) estudaram o desempenho da escória de alto-forno em substituição ao cimento nos teores de 40%, 50% e 60% e observaram, por meio do MEV, que a microestrutura do concreto contendo alto teor de escória (60%) apresentou-se mais densa, com melhor aderência pasta/agregado.

Oliveira (2000) analisou a água dos poros de cimentos com escória, em teor de 90%, e observou uma pequena redução do pH, sendo o valor de 12.6 para a pasta sem adições e 11.8 para a pasta com escória.

#### 2.4.2.4 Cinza de casca de arroz

Este tipo de pozolana apresenta comportamento similar ao da sílica ativa.

Furquim (2006) classifica como uma espécie de ‘superpozolana’ se obtida por meio de queima controlada. A razão da elevada reatividade desta pozolana se deve a sua obtenção à temperaturas entre 500 e 700°C, acentuando sua superfície específica, o que facilita a formação do silicato de cálcio hidratado.

Estudos realizados por Isaia et al. (2000) em concretos com idades de 91 dias, adotando a substituição de cimento por teores de 12,5; 25 e 50% de cinza de casca de arroz, com relação água / aglomerantes de 0,35; 0,50 e 0,65, indicaram acréscimos na resistência à compressão.

O efeito físico, acompanhado do efeito pozolânico da cinza de casca de arroz, contribuiu para a segmentação dos poros do concreto, proporcionando o

refinamento dos grãos de hidróxido de cálcio, formando cristais de menores dimensões. Com isto, a zona de transição pasta-agregado é diminuída e reforçada pela produção de C-S-H secundário, sendo este um dos maiores responsáveis pelo aumento da resistência à compressão, associado aos valores da relação água / cimento (VAGHETTI, 1999).

#### 2.4.2.5 Filer calcário

A adição de filer calcário ao cimento interfere favoravelmente nas propriedades do concreto convencional, tais como: trabalhabilidade, densidade, exsudação, permeabilidade, capilaridade. Muito embora este material não apresente atividade pozolânica, pode desenvolver uma micro nucleação.

Segundo Neville (1997), o filer calcáreo, por apresentar finura da mesma ordem de grandeza do cimento Portland, exerce um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto. O emprego do filer calcáreo está vinculado à produção do cimento Portland no Brasil, sendo admitidos, pela norma NBR-7122, teores de até 10%. Este material difere das demais adições por reagir pouco com a água e com compostos do cimento hidratado, muito embora uma pequena atividade química com alguns compostos de hidratação do cimento possa ser observada (MORAES, 2001). Isto indica um comportamento diferenciado em função de efeitos físicos de colmatação dos poros e complemento de granulometria.

Conforme Winck (2002), o filer deve apresentar uniformidade em suas propriedades, especialmente na finura, e não deve provocar elevação no consumo da água de amassamento do concreto, a menos que usado junto com um aditivo redutor de água, para não prejudicar a resistência mecânica. O autor cogita a possibilidade de utilização deste filer em teores na ordem de 15 a 20% na forma de adição ao cimento Portland.

#### 2.4.2.6 Cal hidratada

Dal Ri (2002), Hoppe Filho (2002) e Stumpp (2003), sugerem o uso de adição da cal hidratada ao concreto visando a reposição parcial ou total das reservas de hidróxido de cálcio a ser consumido nas reações pozolânicas. Esta

incorporação da cal visa manter o nível de alcalinidade do concreto, que sofre decréscimo em função da reatividade da acidez, e do teor de cada adição.

Conforme Heikal et al. (2000), a adição de cal hidratada, a qual reage com as pozolanas e forma o C-S-H, provoca a redução da porosidade total, ocorrendo a formação de uma estrutura mais densa e a aceleração na taxa de hidratação do cimento. Se por um lado, a adição da cal exerce o efeito filler, quimicamente origina reações com a fase aluminato, produzindo carboaluminato.

Stumpp (2003) verificou, para misturas com adição de cal hidratada e com a mesma relação água/aglomerantes, redução nas profundidades e nos coeficientes de carbonatação. Ocorreram os menores coeficientes de carbonatação nos teores de 70% de escória com 15% de cal utilizando relação água /aglomerantes 0,55.

Misturas binárias com cal hidratada e cinza de casca de arroz, segundo Dal Ri (2002), foram as que apresentaram melhor desempenho em relação ao concreto de referência, com redução na penetração de cloretos de 92% para 83% em função da adição da cal. Estas adições provocaram ainda maior retenção total de cloretos nas misturas ensaiadas.

## 2.5 MICROESTRUTURA

As incorporações de adições estão ligadas diretamente à microestrutura da pasta e sua interação com os agregados, reduzindo, por exemplo, o efeito parede e garantindo maior durabilidade aos concretos. O papel desempenhado pelas adições minerais depende de vários fatores, que interagem entre si, constituindo-se num mecanismo complexo, que exige estudos aprofundados em cada caso específico.

### 2.5.1 Microestrutura da Pasta de Cimento

A pasta de cimento é o constituinte ativo do concreto e sua durabilidade está diretamente ligada às características determinadas pela sua microestrutura, as quais dizem respeito à natureza do corpo sólido, formação de cristais e presença de poros. A estrutura destes poros interfere diretamente no desempenho mecânico do conjunto como um todo.

As características microestruturais da pasta dependem de fatores como: a natureza física e química do cimento, tipo e quantidade de adições minerais, temperatura e período de hidratação e a relação água/aglomerante. Para se explicar o comportamento da fase sólida, é necessária a verificação da morfologia dos compostos formados a partir da pasta. Também é necessária uma verificação da porosidade total, bem como, a análise da distribuição do tamanho dos poros. Este processo está vinculado diretamente ao mecanismo de hidratação do cimento. (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Para Mehta e Monteiro (1994), o mecanismo de hidratação do cimento Portland é constituído por um processo de dissolução-precipitação nas primeiras fases, seguido de um processo topoquímico. Os tipos, quantidades e características das duas principais fases sólidas presentes na pasta são:

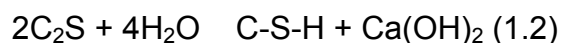
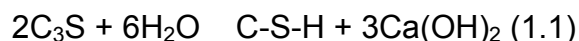
Silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que constitui de 50 a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, sendo conseqüentemente, o componente que exerce maior influência nas propriedades da pasta. A morfologia do C-S-H varia de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino, como mostra a figura 05.

**Figura 05** – Hidratação do silicato de cálcio em pasta de cimento Portland



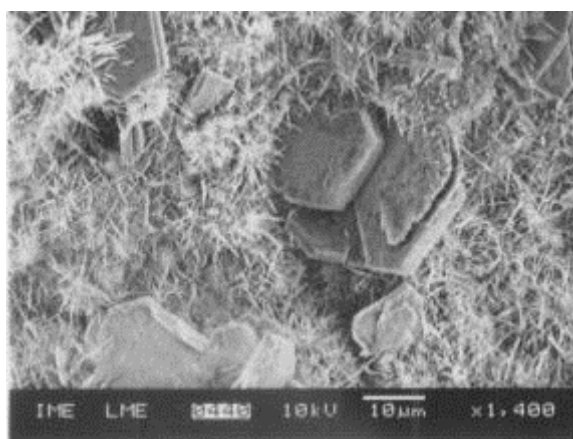
**Fonte:** Mehta e Monteiro (1994)

Cálculos estequiométricos determinam que a reação de hidratação do  $C_3S$  resulta em 61% de  $C_3S_2H_3$  e 39% de  $Ca(OH)_2$  e a hidratação do  $C_2S$  em 82% de  $C_3S_2H_3$  e 18% de  $Ca(OH)_2$ . O componente  $C_3S$  precisa de 24% de água para se hidratar e o  $C_2S$  apenas 21%. As reações aproximadas são apresentadas a seguir:



**Hidróxido de cálcio:** com estequiometria definida, o  $Ca(OH)_2$ , abreviado como CH, constitui de 20 a 25% do volume dos sólidos da pasta hidratada. Tende a se apresentar em cristais grandes, sob a forma de prismas hexagonais distintos, como mostra a figura 6. Porém, pode se apresentar sob formas não definidas. A morfologia e quantidade são afetadas, principalmente, pelo espaço disponível na estrutura da pasta.

**Figura 06** – Cristais pseudo-hexagonais de  $Ca(OH)_2$  e fibrilas de C-S-H tipo (I) (1.400X)

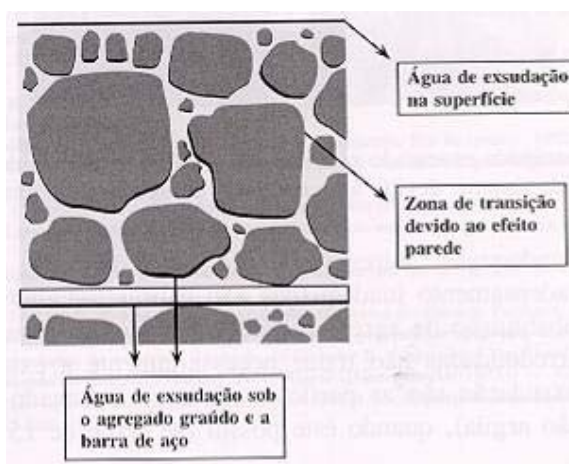


Fonte: Mehta e Monteiro (1994).

A pasta de cimento endurecida é constituída, segundo Aitcin (2000), por um material cristalino de uma única fase, para o qual valem os princípios fundamentais de comportamento dos materiais frágeis, como as cerâmicas, o que permite controlar a microestrutura e as propriedades do concreto. Sendo a resistência dos materiais cerâmicos derivada, principalmente, das forças de atração das partículas, quanto menor for a porosidade, maior será a resistência, ou seja, tanto maior quanto maior a quantidade de C-S-H.

Entretanto, outro fator que interfere no desempenho mecânico da pasta é a concentração de água na zona de interface pasta/agregado, como mostra a figura 07. O uso de elevada relação água/aglomerante induz à formação de compostos de maiores dimensões, como os cristais de hidróxido de cálcio, devido ao maior espaço livre nesta área.

**Figura 07 – Exsudação do concreto**



Fonte: Guimarães, 2005.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), os cristais de hidróxido de cálcio têm dimensões que variam de 1 a 10 $\mu$ m, sendo que, quanto maior o índice de poros da pasta, maior será o teor de hidróxido de cálcio presente. A resistência do hidróxido de cálcio é relativamente baixa em comparação à resistência desenvolvida pelo silicato de cálcio hidratado, e considerando a maior porosidade da zona de transição e da interface concreto/forma, estas regiões se tornam locais de maior incidência de fissuras devido ao acúmulo de tensões. Uma vez que, conforme Isaia (2001), as tensões são transferidas de grão a grão e crescem com o passar do tempo, seja por aumento de carga ou variações das condições termohigrométricas (retração), estas regiões são mais suscetíveis a rupturas.

Segundo Nielsen (1993) apud Aïtcin (2000), os fatores porosidade, tamanho do grão e heterogeneidade da pasta, interferem diretamente na resistência mecânica, sendo que esta conclusão se aplica também à durabilidade do concreto.

Dois outros fatores, segundo Paulon (2005), são muito importantes no estudo da microestrutura da pasta de cimento: a relação água / cimento e a idade, os quais estão diretamente relacionados à porosidade. Quanto maior esta relação, maior será o volume de poros presente na pasta, afetando diretamente a sua resistência mecânica e durabilidade. Quanto à idade, as reações topoquímicas ocorrem nos primeiros minutos após a hidratação, sendo que, nas primeiras horas se verificam alterações na microestrutura da pasta bastante rápidas, decrescendo após a primeira semana, muito embora o processo de hidratação continue indefinidamente.

Tão logo os compostos de silicatos entrem em contato com a água, inicia-se o processo de hidratação, através da dissolução / precipitação, ou seja, a fase líquida satura-se de vários íons, os quais dão início à formação de diferentes produtos de hidratação, que passam a preencher os espaços anteriormente ocupados pela água. Quando estes espaços não são totalmente preenchidos, ocorre a formação de poros. Com a sequência da hidratação e, conseqüentemente, a redução da porosidade capilar, verifica-se uma redução na movimentação da umidade no sistema. Conforme Aïtcin (2000), a hidratação subsequente das porções não hidratadas das partículas de cimento é um processo de reações de estado sólido, no qual as reações acontecem diretamente na superfície dos compostos anidros, sem que estejam em solução.

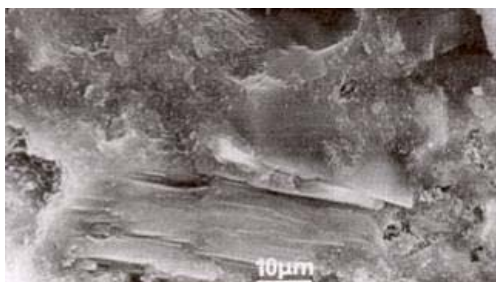
Por meio de estudos por microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi constatado que os produtos gerados no início do processo de hidratação, quando ainda existe água e espaço vazio no sistema, se apresentam na forma de flocos de grandes cristais, que geram considerável volume de vazios na pasta. Como estes produtos iniciais da hidratação cristalizam-se fora dos limites originais das partículas anidras de cimento, no espaço preenchido pela água que envolve tais partículas, estes são denominados “produtos externos”, conforme figura 08 (AÏTCIN, 2000)

**Figura 08 – PRODUTOS EXTERNOS DA HIDRATAÇÃO**



Fonte: Aïtcin, 2000.

Por sua vez, os produtos da hidratação das reações de estado sólido, formados dentro dos limites originais das partículas de cimento em hidratação, são denominados “produtos internos”, como mostra a figura 09. Estes apresentam estrutura mais compacta e menos cristalina. (AÏTCIN, 2000).

**Figura 09** – Produtos internos da hidratação

Fonte: Aitcin, 2000.

Do ponto de vista da resistência da pasta endurecida, esta deve apresentar uma microestrutura similar à dos produtos internos. O conceito de produtos internos e externos facilita o entendimento da importância de se utilizar uma baixa relação água / aglomerante, bem como do papel desempenhado pelas adições minerais.

A durabilidade das estruturas de concreto é influenciada acentuadamente por um fator crítico que é a relação entre a distribuição e o tamanho dos poros, uma vez que a profundidade de penetração de agentes externos depende da interligação entre estes poros e de sua forma.

Conforme Andrade (2005), o processo de degradação que ocorre em compostos sólidos porosos, formados de pastas de cimento Portland com adições minerais, é decorrente dos mecanismos de transporte que facilitam o deslocamento das substâncias presentes no meio externo, através da estrutura de poros e interstícios do concreto.

Em relação ao diâmetro dos poros, segundo Mindess e Young (1981) apud Silveira (2004), estes se classificam em capilares e poros de gel. Os capilares, os quais exercem maior influência na movimentação de líquidos e gases no interior do concreto, são divididos em mesoporos ( $10 < \_ < 50\text{nm}$ ) e macroporos ( $\_ > 50\text{nm}$ ), afetando, principalmente, a resistência mecânica e a permeabilidade dos concretos. Os poros de gel, também denominados de microporos, possuem diâmetro menor que 10nm, influenciando os fenômenos da retração e da fluência.

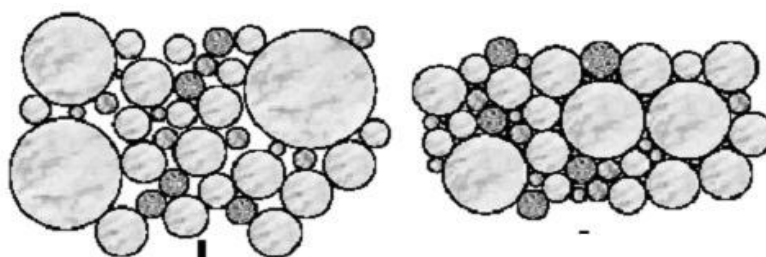
Desta forma, pode-se afirmar que a pasta de cimento constitui-se em um produto relativamente heterogêneo de elementos sólidos, micro-cristais, com a ocorrência de espaços vazios que podem conter soluções. Esta estrutura pode ser alterada favoravelmente por meio das adições minerais.

### 2.5.2 Desempenho das Adições na Microestrutura da Pasta de Cimento

Na reação de hidratação do cimento com adições, observam-se dois efeitos físicos importantes: refinamento do tamanho dos poros e refinamento do tamanho dos grãos. O silicato de cálcio hidratado secundário, ao formar-se ao redor das partículas minerais, tende a preencher parcialmente os vazios capilares com um material micro-poroso. Estes efeitos tornam as pastas menos permeáveis, e portanto, mais resistentes e duráveis (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Para Neville (1997), além da ação química que pode decorrer da adição mineral, verifica-se a ocorrência de uma ação física, denominada de efeito filer (figura 10), que consiste no preenchimento dos vazios, ou seja, na colmatação dos espaços entre os grãos, tornando a estrutura mais densa e mais compacta, evidenciando o efeito benéfico destas adições minerais ao cimento.

**Figura 10** – Concreto sem adições minerais (esquerda) e com adições minerais (direita)



**Fonte:** Adaptado de Formagini (2005).

O efeito filer torna a estrutura mais densa e mais compacta, em decorrência destas adições minerais finamente divididas, como destaca Klein (2008).

Paralelamente, verifica-se o fenômeno de nucleação, que consiste na formação de cristais na superfície das partículas minerais, adicionadas ao cimento, ao longo do processo da hidratação. (DAL MOLIN, 2005).

Segundo Hoppe (2002), a adição de partículas inertes, de dimensão similar ou inferior às partículas do ligante, quando inseridas no sistema cimentício, atuam como pontos extras de nucleação, ocorrendo a precipitação de hidratos sobre a superfície dos grãos de filer.

Ainda, segundo Lawrence (2003), a distribuição granulométrica e, conseqüentemente, a área específica, o teor utilizado em substituição ao cimento e

a afinidade com os compostos hidráulicos são fatores preponderantes para a eficiência da adição mineral.

A incorporação dos finos, conforme Pileggi (2001), otimiza o grau de empacotamento das partículas por meio do controle da sua distribuição granulométrica. Desta maneira, a correção da granulometria do material por meio de adição de pós ultra finos, traz como benefício um melhor empacotamento nos sistemas compostos por partículas. Esta densificação é consequência do valor do quociente entre o diâmetro das partículas maiores e das partículas menores, associada ao número de partículas em relação ao total de cimento.

Estas alterações, decorrentes das adições minerais, garantem uma pasta endurecida menos porosa, devido a ocorrência e distribuição de tamanho dos poros.

Por outro lado, verifica-se, em função do perfil granulométrico da adição mineral, uma intensificação do fenômeno do empacotamento, com maior acomodação de partículas de diferentes dimensões, resultando na formação de uma matriz mais densa e com menor índice de vazios.

Os estudos relacionados ao empacotamento de partículas, tanto teóricos, como experimentais, se baseiam em duas abordagens fundamentais: uma discreta, que considera as partículas individualmente, como nos modelos de Furnas e de Westman e Hugill; e outra contínua, onde as distribuições de partículas são tratadas de maneira contínua, como nos modelos de Andreasen e Alfred. Esta segunda abordagem é a mais aceita atualmente, uma vez que, em distribuições reais de partículas, todos os tamanhos (diâmetros) podem estar presentes (PILEGGI, 2001).

O modelo proposto por Andreasen considera duas partículas específicas com dimensões muito diferentes, definidas por um método de distribuição logarítmica. Este método foi aperfeiçoado pelos pesquisadores Funk e Dinger, introduzindo no modelo de Andreasen o conceito do tamanho mínimo de partícula, tornando-o mais próximo da realidade (PILEGGI, 2001).

Adicionalmente, o aumento da extensão granulométrica é expresso pela razão entre partículas maiores e menores, o que equivale a afirmar que, quanto maior a extensão granulométrica, menor a porosidade teórica da distribuição.

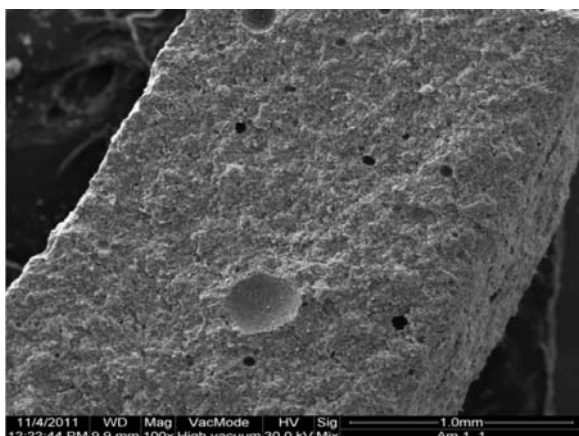
Segundo Oliveira (2011), ao incorporar finos de basalto ao cimento Portland, observou-se uma aceleração no tempo de pega, possivelmente em função

do fenômeno da nucleação, o qual se verifica na superfície dos finos adicionados, em cujas superfícies se cristalizam compostos de cimento hidratados.

Outro fator a ser considerado é que a elevação do teor de finos de basalto incorporados ao cimento, devido ao preenchimento dos poros da pasta, traz como consequência a redução da quantidade de água a ser absorvida pela pasta endurecida, contribuindo também para a redução da permeabilidade.

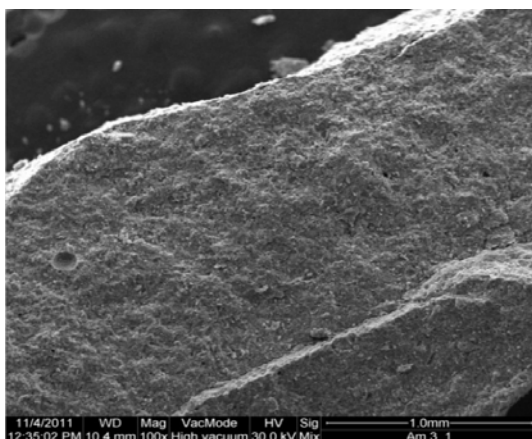
As figuras 11 e 12 apresentam imagens obtidas no MEV por Oliveira (2011), ao analisar amostras de pasta de cimento com adição de teores de 2,5% e 5,0% de finos de basalto, sem peneiramento prévio, com aproximação de 100 vezes. Foi observado que, para teores de 5%, houve uma redução na concentração e nas dimensões dos poros, se comparada à pasta contendo 2,5% de finos de basalto.

**Figura 11** – Pasta de cimento com 2,5 % de finos de basalto



Fonte: Oliveira, 2011.

**Figura 12** – Pasta de cimento com 5 % de finos de basalto



Fonte: Oliveira, 2011.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

Esta pesquisa científica tem a validade e conclusão dos seus resultados atreladas ao rigor na aplicação dos métodos e técnicas de ensaio, objetivando a obtenção de dados, o mais confiáveis possível.

Com este propósito, foi implementado o trabalho experimental, visando a obtenção de subsídios para analisar o desempenho e emitir conclusões quanto aos efeitos das adições de resíduos de britagens (RB) ao cimento, conforme proposto nesta pesquisa.

O objetivo básico é investigar a influência da substituição de parte do cimento por frações diferenciadas do RB, visando melhor grau de empacotamento, bem como, verificar a ocorrência do efeito de nucleação, melhorando algumas propriedades da pasta de cimento.

Após a coleta de materiais, foram realizados ensaios de caracterização dos mesmos, avaliação da resistência mecânica à compressão de argamassas e verificação do efeito de nucleação na pasta de cimento, em função da adição de diferentes percentuais de filer basáltico em substituição à massa de cimento Portland.

Foram estudadas três diferentes frações de RB, empregadas isoladamente e em conjunto, ou sejam, resíduo de basalto *in natura*, com dimensões entre 1-100 micrômetros (RB); fração fina, entre 1-10 micrômetros (RBF) e fração intermediária ou grossa entre 10-100 micrômetros (RBG). Foram empregadas frações finas (RBF) e grossas (RBG) de RB, nos teores de 1%, 2,5%, 5%, 10% e 15%.

Para a análise da microestrutura da pasta, foi empregada a microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Estas avaliações foram complementadas com a verificação da resistência à compressão na idade de 7 dias, por meio de corpos de prova cilíndricos (5x10cm) em argamassa, segundo o traço unitário em massa 1:3, os quais foram rompidos à compressão axial, após cura em câmara úmida.

Os estudos laboratoriais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise da UEL e no Laboratório de Concreto do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado

de São Paulo – IPT. Foram realizados, também, ensaios de granulometria a laser no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP.

Laboratórios:

- Laboratório de Materiais de Construção Civil - UEL;
- Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise – UEL;
- Laboratório de DRX – UEL;
- Laboratório de Concreto do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo;
- Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da USP;

### 3.1 MATERIAIS

Os materiais empregados neste estudo foram os seguintes: cimento Portland CP-V ARI, areia normal brasileira e resíduo de britagem basáltica.

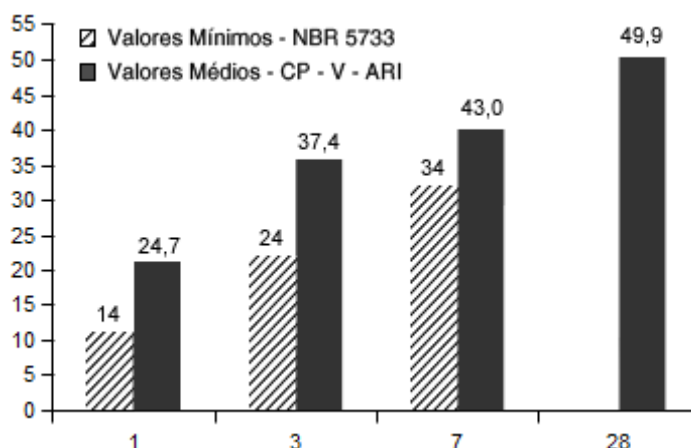
#### 3.1.1 Cimento *Portland*

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CPV-ARI, de alta resistência inicial, de acordo com a NBR-5733, tendo em vista se tratar de um aglomerante com menor teor de adições e elevado teor de silicatos cálcicos, dentre os disponíveis comercialmente, bem como por apresentar maior finura, o que intensifica a reação com a água, garantindo elevadas resistências à compressão nas primeiras idades.

Dentre as suas principais características, além da alta resistência mecânica inicial, estão a regularidade nas propriedades físico-químicas, regularidade nas resistências, alto padrão de controle de qualidade e resistência final elevada. Além disto, em função de suas características, este tipo de cimento permite redução no consumo e traz como vantagens a desforma rápida das peças, maior rapidez na execução, proporcionando otimização dos custos.

A figura 13 apresenta a evolução da resistência mecânica do cimento CP-V ARI em função das idades.

**Figura 13** – evolução da resistência mecânica do cimento ARI em função da idade



**Obs.:** A Resistência à Compressão aos 28 dias do CP V-ARI é regida pela NBR 5733, a qual não estabelece valor mínimo. A massa específica média do CP V-ARI ITAMBÉ é 3,12 g/cm<sup>3</sup>. (NBRNM 23).

**Fonte:** Itambé, 2012

### 3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia normal brasileira, silicosa, adquirida junto ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. A exigência do uso da areia normal brasileira como material de referência está estabelecida na norma ABNT NBR 7215: 1996 - Ensaio de cimento Portland: Método de ensaio, sendo empregada na moldagem de corpos-de-prova visando classificar o cimento de acordo com sua resistência mecânica à compressão, isto é, classe 25, 32 ou 40 MPa.

### 3.1.3 Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento do município de Londrina, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

### 3.1.4 Resíduos de Britagem - RB

Os resíduos utilizados foram provenientes de uma pedreira da região de Londrina, onde se procede a britagem da rocha basáltica. Este material residual apresenta diferentes frações granulométricas, sendo o resíduo de basalto *in natura*

um material com dimensões entre 1-100 micrômetros. Foram empregadas ainda outras duas frações, denominadas fração fina (RBF), com dimensões entre 1-10 micrômetros e fração intermediária ou grossa (RBG), entre 10-100 micrômetros, obtidos por estratificação por meio da sedimentação.

## 3.2 MÉTODO

O método proposto consiste dos seguintes tópicos:

- Amostragem de RB;
- Caracterização dos materiais;
- Granulometria à laser, do Cimento CP-V ARI e do Resíduo de Basalto
- Avaliação do desempenho mecânico das argamassas contendo RB;
- Análise das pastas por microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Análise do RB por difração de Raios-X (DRX);

### 3.2.1 Amostragem de RB

A coleta dos RB foi realizada em uma pedreira localizada na região metropolitana de Londrina nos meses de março e abril de 2012, diretamente no filtro de mangas do britador. Foram retiradas amostras diárias de 12 Kg durante 7 dias, reduzidas por quarteamento até 3.0 kg/dia, resultando em uma amostra média de 21 kg, a qual, em seguida, foi homogeneizada, obtendo-se uma amostra representativa do lote. O material foi acondicionado em sacos plásticos estocados no Laboratório de Materiais da UEL.

## 3.2.2 Caracterização dos Materiais

### 3.2.2.1 Cimento

#### 3.2.2.1.1 *Granulometria à laser*

A distribuição granulométrica do Cimento Portland CP V ARI, foi determinada por meio de granulômetro à laser MALVERN METASIZER 2000 no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, LCT-EP-USP. As demais características foram fornecidas pelo fabricante.

#### 3.2.2.1.2 *Composição química*

#### 3.2.2.1.3 *Expansão à quente*

#### 3.2.2.1.4 *Tempo de pega*

#### 3.2.2.1.5 *Superfície específica (Blaine)*

#### 3.2.2.1.6 *Resistência à compressão*

### 3.2.2.2 Resíduo de britagem in natura

#### 3.2.2.2.1 *Granulometria a laser*

A distribuição granulométrica do resíduo basáltico *in natura* (RB) e de suas frações grossa (RBG) e fina (RBF), foram determinadas por meio de granulômetro à laser MALVERN METASIZER 2000 no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, LCT-EP-USP.

### 3.2.2.2 Massa específica do RB *in natura*

A realização do ensaio de massa específica seguiu as recomendações da NM 23/2001, que prescreve o método a ser utilizado para cimento Portland e outros materiais em pó, empregando o Frasco de Le Chatelier.

Para a massa específica do resíduo basáltico (RB) e suas frações grossa (RBG) e fina (RBF), foram adotados os valores obtidos por meio do frasco de Le Chatelier, conforme ABNT NBR NM 23/2001, empregando água destilada.

### 3.2.2.3 Estratificação do RB por sedimentação

As amostras de RB, retiradas após o processo de moagem do basalto, dispersas em meio aquoso, tendo sido separadas por meio de sedimentação. Foram separadas as frações de RBF, entre 1-10 micrômetros e RBG, entre 10-100 micrômetros.

Para tanto, misturou-se uma amostra de 1 kg de RB em uma proveta contendo dois litros de água como mostra a figura 14, deixando-se a suspensão em repouso por 45 minutos,.

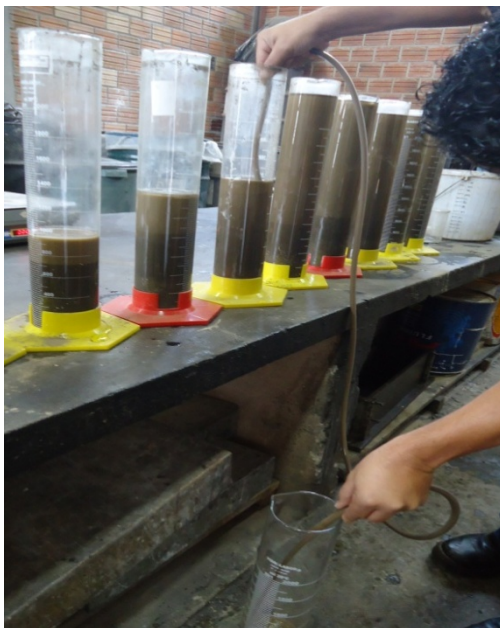
**Figura 14** – Suspensão do RB *in natura* em repouso para sedimentação



Fonte: O Autor (2012)

Em seguida, removeu-se o líquido contendo o material ainda em suspensão, com o auxílio de uma mangueira, como mostram as Figuras 15 e 16.

**Figura 15** – Remoção da suspensão contendo RBF



Fonte: O Autor (2012)

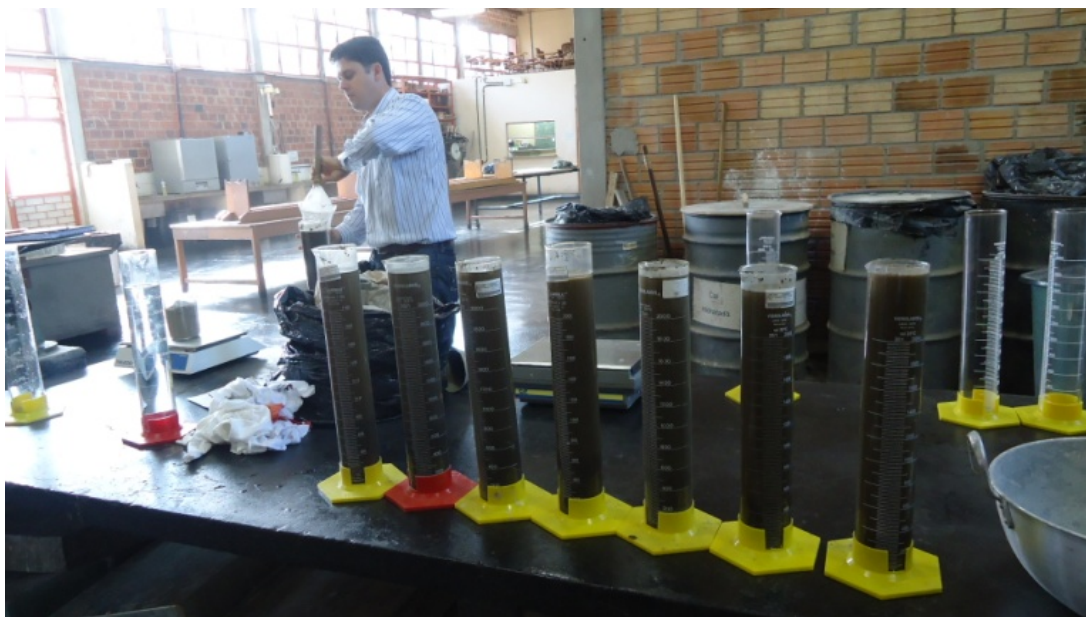
**Figura 16** – Remoção da suspensão contendo RBF



Fonte: O Autor (2012)

À fração de material decantado, mostrado na figura 17, após os 45 minutos, deu-se o nome de resíduo basáltico intermediário ou grosso (RBG) e ao material em suspensão, removido após os 45 minutos, deu-se o nome de resíduo basáltico fino (RBF).

**Figura 17 – Material decantado**



Fonte: O Autor, 2012

**Figura 18 – Coleta do Material decantado**



Fonte: O Autor, 2012

Tanto a fração decantada, quanto a suspensão, foram secas em estufa a  $100 \pm 1^\circ\text{C}$ , resultando nas amostras RBF e RBG, conforme figura 19.

**Figura 19 – Secagem do RB em estufa**

Fonte: O Autor, 2012

### 3.2.2.4 Composição das pastas de cimentos com RB

Os cimentos utilizados para a produção de pastas e argamassas constam na Tabela 8, com taxas de substituição da massa de CP-V ARI por RB iguais a 1%, 2,5%, 5%, 10% e 15% de resíduo de basalto fino (RBF); e 5%, 10% e 15% de resíduo de basalto grosso (RBG). Estas composições foram comparadas com uma amostra de referência, na qual foi utilizado apenas o cimento sem adições.

**Tabela 8 – Composição dos cimentos com RB**

NOMENCLATURA DAS COMPOSIÇÕES	CP V ARI (%)	Teor de RBG (%)	Teor de RBF (%)
REFERÊNCIA (REF.)	100,0	0	0
CP + 1,0% RBF	99,0	0	1,0
CP + 2,5% RBF	97,5	0	2,5
CP + 5,0% RBF	95,0	0	5
CP + 10,0% RBF	90,0	0	10
CP + 15,0% RBF	85,0	0	15
CP + 5,0% RBG	95,0	5,0	0
CP + 10,0% RBG	90,0	10,0	0
CP + 15,0% RBG	85,0	15,0	0

Fonte: O Autor, 2012

### 3.2.2.5 Avaliação da resistência mecânica à compressão dos cimentos com RB

A determinação da resistência mecânica à compressão dos diferentes cimentos foi realizada a partir de corpos de provas cilíndricos (5 x 10 cm) de argamassa, utilizando areia normal brasileira, conforme figura 20, seguindo as recomendações da norma NBR-7215.

**Figura 20** – Materiais utilizados na produção de argamassa



Fonte: O Autor, 2012

Foram produzidos 3 corpos de prova para o cimento de referência e 3 corpos de prova para cada teor de adição, como apresenta a figura 21. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos à cura por imersão em água, como mostra a figura 22, até a data de ruptura. Os corpos de prova foram rompidos por compressão axial, como mostra a figura 23, tendo sido utilizados discos de neoprene em substituição ao capeamento tradicional.

**Figura 21** – Corpos de prova de argamassa moldados em formas metálicas (5x10cm)



Fonte: O Autor, 2012

**Figura 22** – Corpos de prova de argamassa após cura por imersão



Fonte: O Autor, 2012

**Figura 23** – Corpo de prova de argamassa rompido por compressão axial.



Fonte: O Autor, 2012

### 3.2.2.6 Verificação do efeito de nucleação na pasta de cimento por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A verificação da ocorrência do efeito de nucleação na pasta de cimento com adição de RB foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A microscopia eletrônica de varredura é usada rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos. A elevada profundidade de foco

(imagem com aparência tridimensional) e a possibilidade de combinar a análise microestrutural com a microanálise química (EDS), são fatores que, em muito, contribuem para o amplo uso desta técnica. A sonda EDS é um dispositivo acoplado ao MEV que permite realizar a microanálise química dos materiais, identificando os elementos presentes nas amostras analisadas. Como as amostras para serem analisadas no MEV devem ser recobertas com ouro, o pico de maior intensidade identificado pela sonda EDS é referente ao elemento Au.

Numa primeira fase, foram analisadas amostras de argamassa de cimento e areia, segundo o traço em massa 1:3, retiradas dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência mecânica à compressão, conforme figura 24. Os testemunhos foram obtidos pela fragmentação dos corpos de prova, com o auxílio de ferramentas manuais, de forma a serem preservadas as características originais da amostra. O objetivo da fragmentação da amostra foi evitar que se tivesse resultados questionáveis, que podem ocorrer quando a mesma é cortada regularmente, o que se caracterizaria como manipulação de resultados. Os fragmentos analisados tinham dimensões médias em torno de 15 mm de diâmetro, devido às restrições dimensionais impostas pelo equipamento.

**Figura 24** – Recipientes contendo testemunhos extraídos dos corpos de prova submetidos à compressão diametral



Fonte: O Autor, 2012

Na segunda fase, foram produzidos corpos de prova de pasta de cimento, conforme o seguinte procedimento:

– Preparo da pasta: a pasta foi amassada manualmente com teor água / finos de 0,48. Esta relação foi determinada experimentalmente, de modo a atender aos requisitos mínimos de trabalhabilidade para produção de corpos de prova.

– Preparo da forma: foi utilizada como forma, segmentos de uma mangueira plástica de 5 mm de diâmetro, comprimento de 15 cm, cortada longitudinalmente para facilitar a moldagem, como mostra a figura 25.

**Figura 25** – Moldagem da amostra de pasta com RB em mangueira plástica de 5mm de diâmetro



Fonte: O Autor, 2012

– Moldagem do corpo de prova: A pasta foi inserida na forma plástica, a qual foi vedada com fita adesiva, garantindo a cura da amostra pelo período de 7 dias.

– Preparo da amostra para análise no MEV: A amostra de 15 cm foi segmentada em frações de 3 cm, tendo sido descartadas as extremidades. De cada fração, foi extraída uma amostra de 5 mm, a qual foi posicionada sobre o anel do aparelho e recoberta com ouro, como mostra a figura 26.

Cabe destacar que a amostra descrita foi produzida unicamente com o cimento com substituição de 15% de cimento por RBF, com a finalidade de verificar a ocorrência do fenômeno de nucleação. Foi escolhido o teor mais elevado por questão de facilidade de visualização no MEV.

**Figura 26** – Amostra de pasta de cimento recoberta com ouro para análise no microscópio de varredura



Fonte: Oliveira, M.F. (2011).

Em seguida, as amostras foram analisadas no MEV, conforme mostra a figura 27. Foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura e Microanálise (Modelo Quanta 600 FEI-Philips; Com : EDS / WDX - Baixo e Alto Vácuo do Laboratório de Microscopia da UEL.

**Figura 27** – Microscópio eletrônico de varredura e micro análise do Laboratório de Microscopia da UEL



Foto do equipamento MEV utilizado na realização do ensaio.

Fonte: O Autor, 2012

## 4 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios com as amostras e os corpos de prova preconizados pelo método estabelecido neste trabalho.

### 4.1 CIMENTO PORTLAND

#### 4.1.1 Análise Granulométrica

O resultado da análise granulométrica do Cimento Portland CP V ARI, determinado por meio de granulômetro à laser MALVERN METASIZER 2000 no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, LCT-EP-USP, é apresentado na tabela 9.

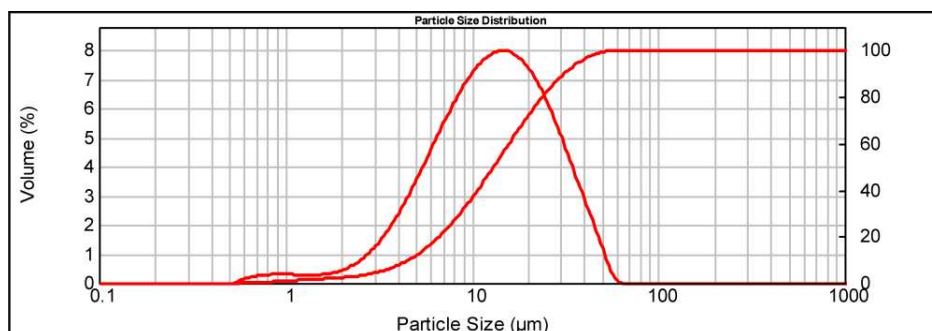
**Tabela 9** – Resultado da análise granulométrica do cimento utilizado

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	0.94	7.096	22.20	50.238	99.38	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	1.16	7.962	26.61	56.368	99.93	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	1.37	8.934	31.47	63.246	100.00	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	1.58	10.024	36.74	70.963	100.00	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.80	11.247	42.34	79.621	100.00	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	2.04	12.619	48.18	89.337	100.00	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	2.33	14.159	54.17	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	2.70	15.887	60.18	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	3.21	17.825	66.12	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	3.89	20.000	71.85	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	4.81	22.440	77.26	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	6.02	25.179	82.24	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	7.58	28.251	86.68	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.12	4.477	9.55	31.698	90.52	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	0.28	5.024	11.97	35.566	93.71	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	0.49	5.637	14.87	39.905	96.23	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	0.71	6.325	18.28	44.774	98.12	316.979	100.00		

Fonte: EPUSP–Laboratório de Caracterização Tecnológica - Anexo I

A curva granulométrica do cimento CP-V ARI é apresentada na figura 28.

**Figura 28** – Distribuição gráfica da análise granulométrica do cimento



Fonte: EPUSP–Laboratório de Caracterização Tecnológica - Anexo I

#### 4.1.2 Outras Características do Cimento

As demais características do cimento CP-V ARI foram fornecidas pelo fabricante, conforme figura 29.

**Figura 29** – Características do cimento Portland CP-V ARI.

CPV-ARI	QUIMICO											
	Composição	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P.Fogo	CaO L.	R.Ins.	Eq.Alc.	
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
	Média	4,1	19,37	2,61	60,6	4,94	2,9	3,22	1,36	0,66	0,61	
	FISICO											
Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	#325	Resistência à Compressão (MPa)				Massa Específica	
mm	início	fim	%	cm <sup>2</sup> /g	%	%	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias	g/cm <sup>3</sup>	
Média	0,35	02:35	03:30	09:36	4.406	0,27	2,40	25,0	37,4	43,0	49,9	3,15

Fonte: Cimento Itambé, 2012

## 4.2 RESÍDUO DE BRITAGEM (RB)

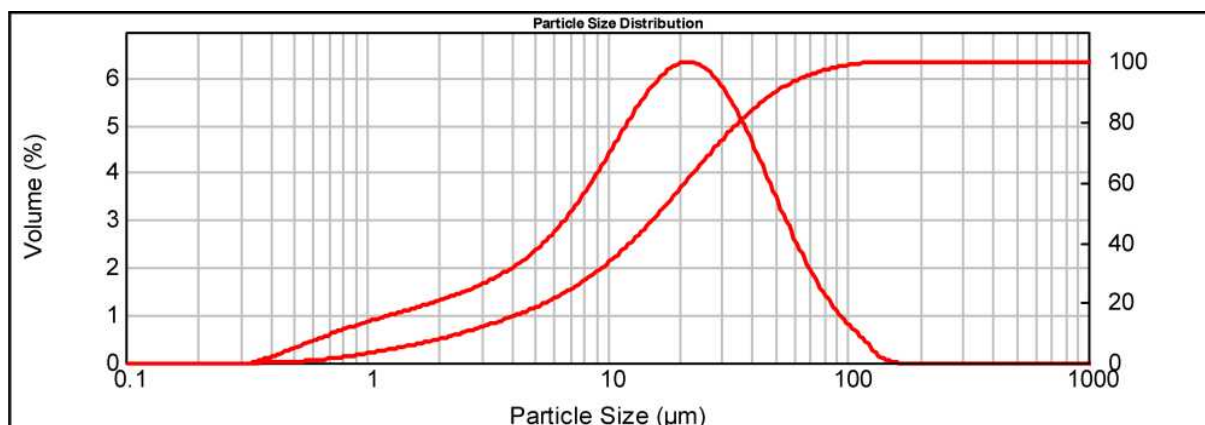
### 4.2.1 Análise Granulométrica

Os resultados da análise da distribuição granulométrica do resíduo basáltico *in natura* (RB) e de suas frações grossa (RBG) e fina (RBF), determinados por meio de granulômetro à laser, são apresentados nas tabelas 10 a 12, e suas respectivas curvas granulométricas nas figuras de 30 a 32.

**Tabela 10** – Resultado da análise granulométrica do RB *in natura*.

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	3.07	7.096	24.59	50.238	90.09	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	3.75	7.962	27.10	56.368	92.49	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	4.47	8.934	29.90	63.246	94.48	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	5.26	10.024	33.00	70.963	96.08	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	6.09	11.247	36.42	79.621	97.33	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	6.99	12.619	40.15	89.337	98.29	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	7.94	14.159	44.19	100.237	99.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	8.95	15.887	48.50	112.468	99.52	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	10.04	17.825	53.04	126.191	99.85	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.07	2.825	11.19	20.000	57.72	141.589	99.97	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.18	3.170	12.42	22.440	62.47	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.39	3.557	13.75	25.179	67.20	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.66	3.991	15.18	28.251	71.79	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	1.00	4.477	16.73	31.698	76.17	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	1.42	5.024	18.42	35.566	80.25	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	1.91	5.637	20.28	39.905	83.95	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	2.46	6.325	22.32	44.774	87.24	316.979	100.00		

Fonte: EPUSP-Laboratório de Caracterização Tecnológica - Anexo II

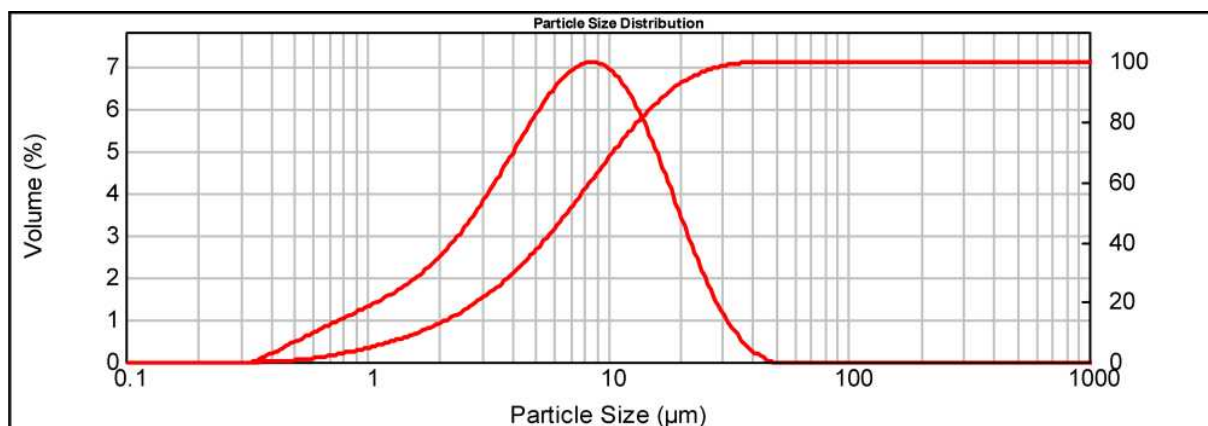
**Figura 30** – Distribuição gráfica da análise granulométrica do RB *in natura*

Fonte: EPUSP-Laboratório de Caracterização Tecnológica - Anexo II

**Tabela 11** – Resultado da análise granulométrica da fração fina de RB (RBF) entre 1-10 micrômetros

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	4.61	7.096	51.69	50.238	100.00	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	5.64	7.962	56.97	56.368	100.00	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	6.78	8.934	62.32	63.246	100.00	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	8.05	10.024	67.63	70.963	100.00	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	9.46	11.247	72.79	79.621	100.00	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	11.04	12.619	77.68	89.337	100.00	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	12.80	14.159	82.20	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	14.78	15.887	86.24	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	17.01	17.825	89.74	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.10	2.825	19.52	20.000	92.68	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.28	3.170	22.35	22.440	95.03	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.59	3.557	25.50	25.179	96.84	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	1.00	3.991	29.02	28.251	98.14	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	1.51	4.477	32.89	31.698	99.02	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	2.13	5.024	37.13	35.566	99.58	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	2.85	5.637	41.70	39.905	99.86	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	3.68	6.325	46.57	44.774	99.99	316.979	100.00		

Fonte: EPUSP-Laboratório de Caracterização Tecnológica - Anexo III

**Figura 31** – Distribuição gráfica da análise granulométrica da fração fina de RB (RBF) entre 1-10 micrômetros

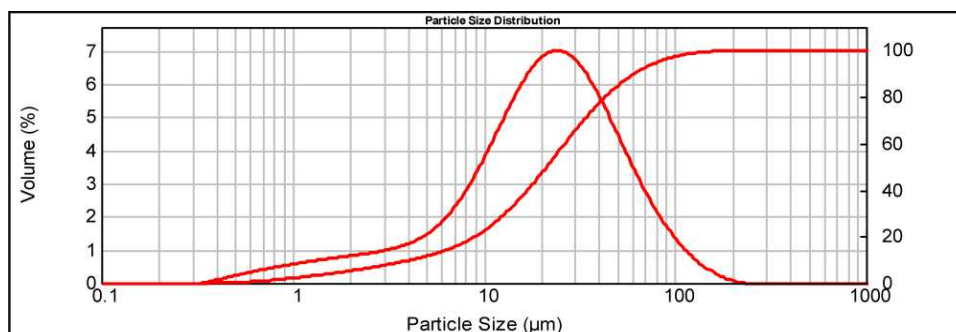
Fonte: EPUSP-Laboratório de Caracterização Tecnológica - Anexo III

**Tabela 12** – Resultado da análise granulométrica da fração intermediária ou grossa do RB (RBG) entre 10-100 micrômetros

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	2.13	7.096	15.78	50.238	84.88	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	2.58	7.962	17.67	56.368	88.01	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	3.07	8.934	19.91	63.246	90.69	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	3.58	10.024	22.54	70.963	92.92	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	4.13	11.247	25.59	79.621	94.76	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	4.70	12.619	29.09	89.337	96.24	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	5.30	14.159	33.04	100.237	97.39	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	5.93	15.887	37.40	112.468	98.28	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	6.60	17.825	42.12	126.191	98.93	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.05	2.825	7.29	20.000	47.13	141.589	99.39	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.14	3.170	8.03	22.440	52.33	158.866	99.70	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.29	3.557	8.81	25.179	57.61	178.250	99.88	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.48	3.991	9.66	28.251	62.85	200.000	99.97	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.72	4.477	10.59	31.698	67.93	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	1.01	5.024	11.62	35.566	72.75	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	1.34	5.637	12.81	39.905	77.22	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	1.72	6.325	14.17	44.774	81.28	316.979	100.00		

Fonte: EPUSP-Laboratório de Caracterização Tecnológica - Anexo IV

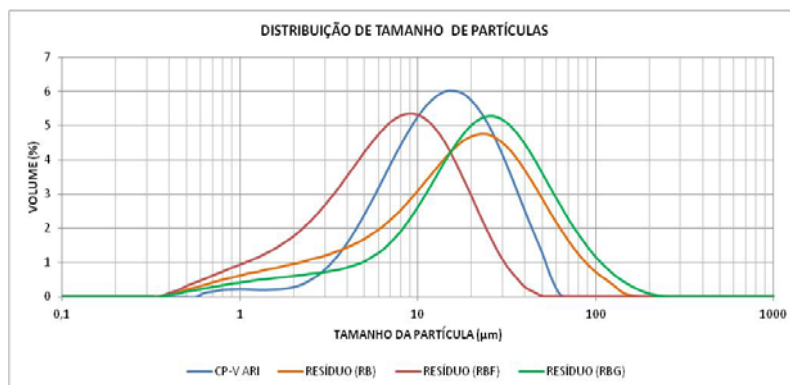
**Figura 32** – Distribuição gráfica da análise granulométrica da fração grossa ou intermediária de RB (RBG) entre 10-100 micrômetros



Fonte: EPUSP-Laboratório de Caracterização Tecnológica - Anexo IV

A figura 33 apresenta as curvas de distribuição granulométricas do cimento CP-V ARI, da fração do RB *in natura*, do RBF e do RBG, determinadas por meio de granulômetro à laser.

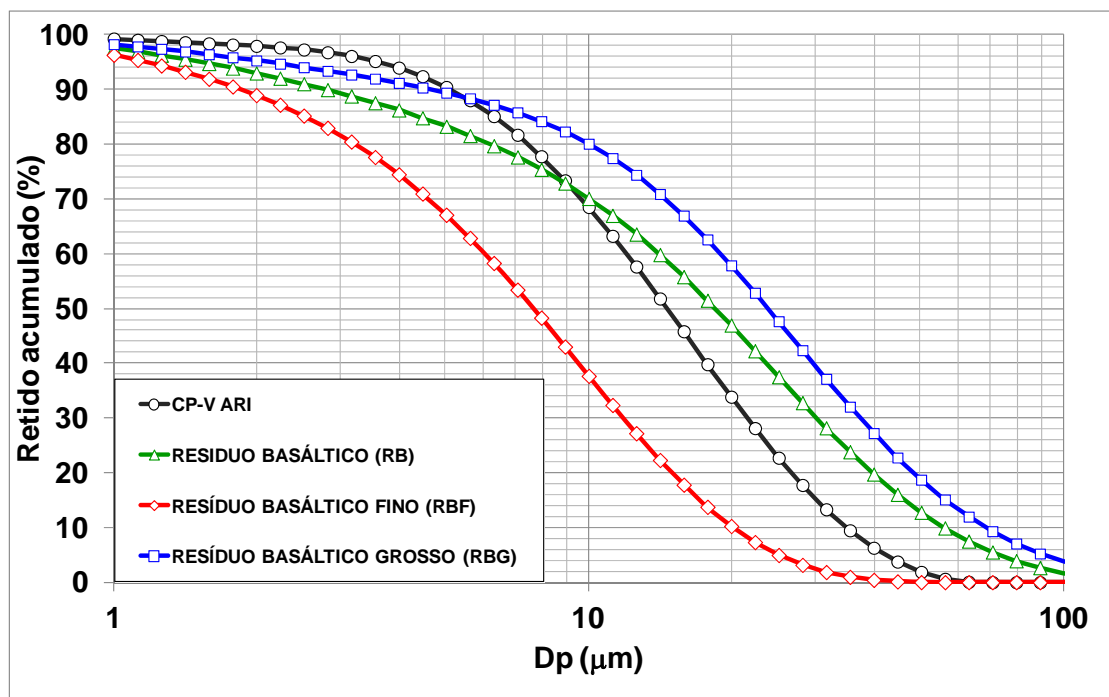
**Figura 33** – Granulometria a laser das amostras de cimento Portland CP- V ARI, do resíduo de basalto *in natura* e das frações grossa (RBG) e fina (RBF)



Fonte: O Autor, 2012

A figura 34 apresenta as curvas granulométricas do cimento CP-V ARI, das frações do RB *in natura*, do RBF e do RBG.

**Figura 34** – Curvas granulométricas do cimento Portland CP V ARI , resíduo basáltico *in natura* (RB), resíduo basáltico grosso (RBG) e resíduo basáltico fino (RBF)



Fonte: O Autor, 2012

#### 4.3 MASSA ESPECÍFICA DO RB

Os valores das massas específicas do cimento CP-V ARI e do resíduo de britagem (RB) *in natura* é apresentado na tabela 13.

**Tabela 13** – Massa específica do RB *in natura*

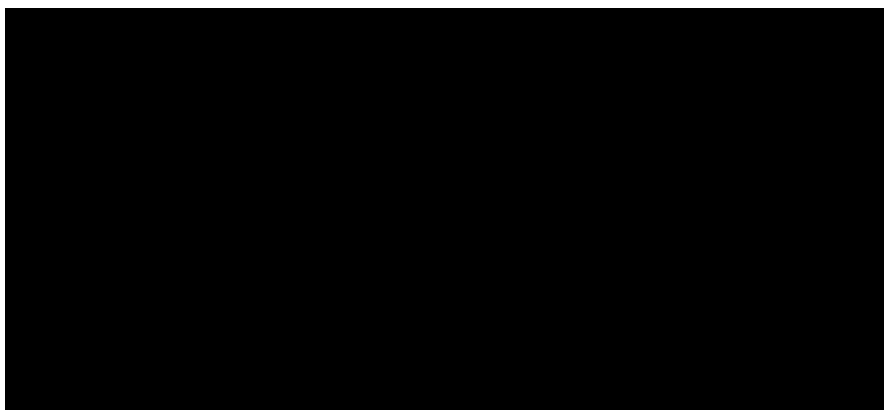
Material	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Cimento CP-V ARI	3,15
Resíduo de britagem (RB)	2,88

Fonte: O Autor, 2012

#### 4.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS COM RB

A tabela 14 apresenta os valores médios e o desvio padrão das resistências mecânicas à compressão dos cimentos analisados por meio de corpos de prova cilíndricos (5 x 10 cm) de argamassa.

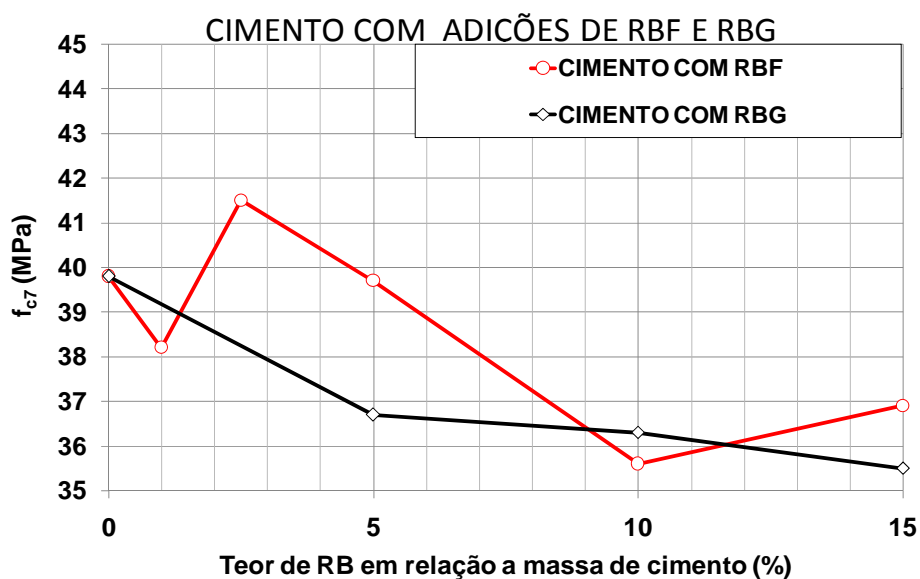
**Tabela 14** – Resistência média compressão dos corpos de prova de argamassa ao 7 dias



Fonte: O Autor, 2012

A figura 34 apresenta a representação gráfica da evolução da resistência à compressão dos cimentos ensaiados à idade de 7 dias.

**Figura 34** – Representação gráfica do efeito do resíduo basáltico (RB) nas frações grossa e fina sobre a resistência mecânica a compressão do cimento CP-V ARI com RB aos 7 dias



Fonte: O Autor, 2012

#### 4.5 ANÁLISE DA PASTA DE CIMENTO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Devido à dificuldade de analisar a fração de pasta presente na argamassa pelo MEV, optou-se por proceder a micro-análise de amostras de pastas de cimento, uma vez que a presença dos grãos de areia prejudicou a identificação do basalto na análise das amostras. A dificuldade em se identificar a procedência do silício observado no ensaio se deve ao fato de que o mesmo poderia se originar, tanto dos grãos de areia, como das partículas de RB.

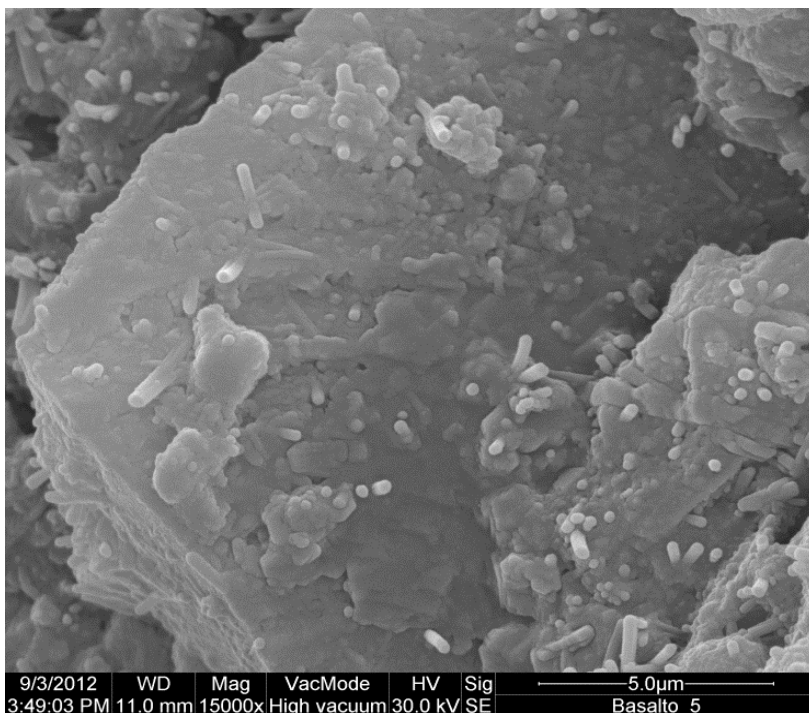
As figuras 35, 36 e 38 apresentam imagens obtidas da pasta contendo RBF nas análises com o MEV. Além disto, a figura 37 mostra o resultado da aplicação da sonda EDS em um ponto da amostra onde não havia nucleação.

**Figura 35** – Amostra de pasta de cimento CP-V ARI com 15% de RBF (Ampliação da imagem em 8.000 vezes)



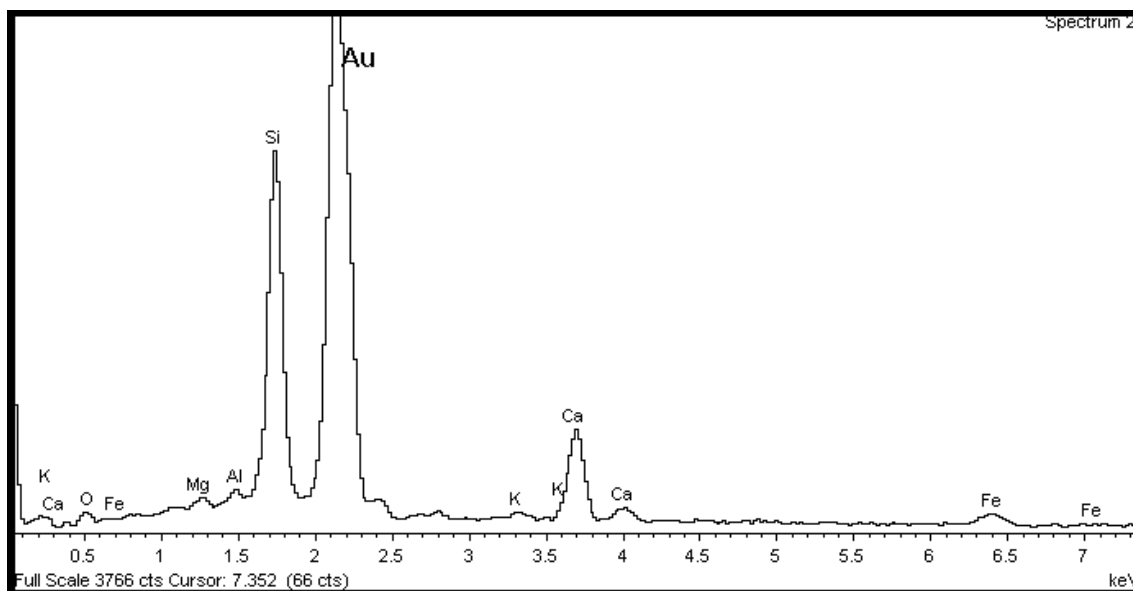
Fonte: O Autor, 2012

**Figura 36** – Ampliação da imagem da figura 35 com a visualização da formação dos cristais de C-S-H na superfície do grão de basalto (RBF) (Ampliação da imagem em 15.000 vezes)



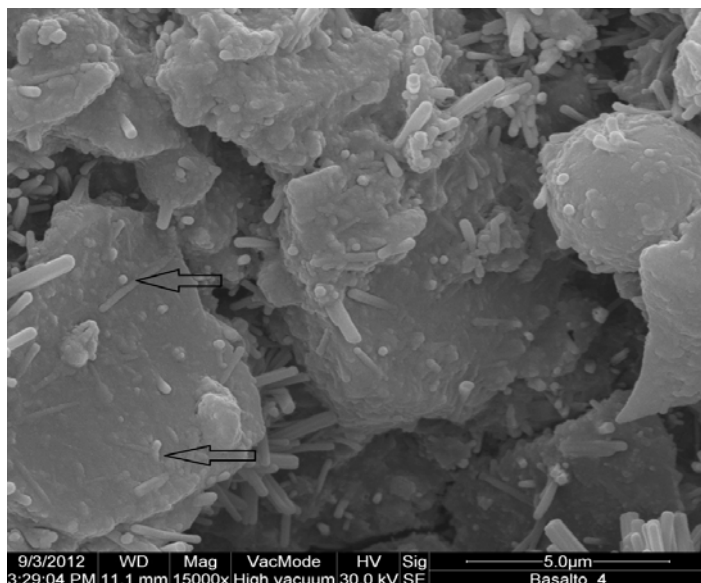
Fonte: O Autor, 2012

**Figura 37** – Resultado da aplicação da Sonda EDS na amostra da figura 35



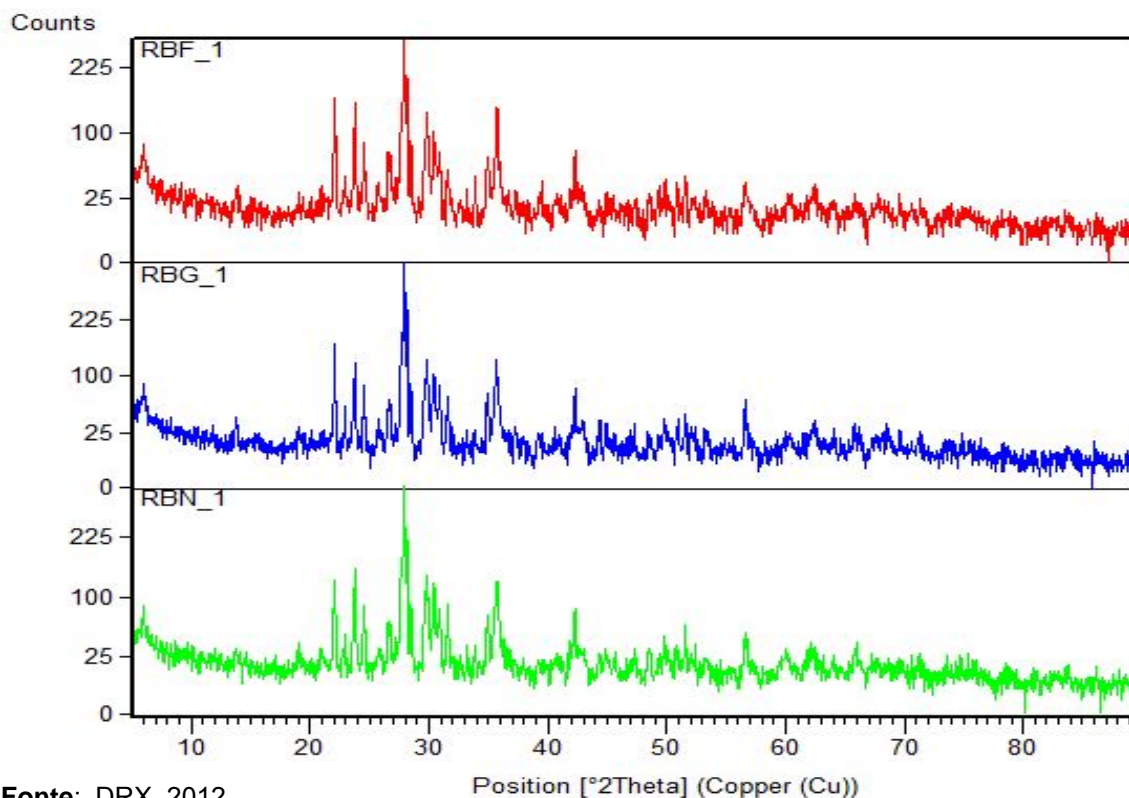
Fonte: O Autor, 2012

**Figura 38** – Ocorrência do efeito de nucleação pelos grãos de RB com a deposição de produtos cimentícios na superfície dos grãos de basalto (Ampliação da imagem em 15.000 vezes)



Fonte: O Autor, 2012

**Figura 39** – Análise das amostras de RB, RBF e RBG por difração de Raios-X



Fonte: DRX, 2012

A figura 39 mostra os resultados das composições químicas das amostras de RBF e RBG em comparação com o RB *in natura*.

## 5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

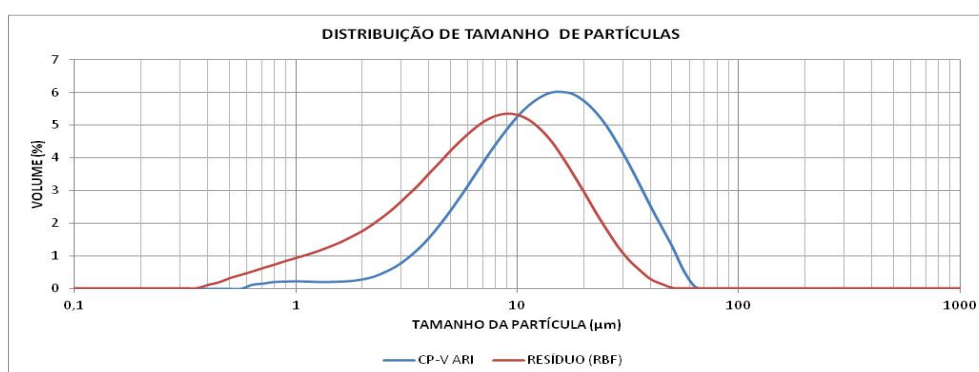
### 5.1 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica do cimento CP-V ARI, igual a  $3,15 \text{ g/cm}^3$ , ligeiramente superior à do resíduo de breitagem (RB), da ordem de  $2,88 \text{ g/cm}^3$ , como consta na tabela 13, justifica o fato dos cimentos produzidos com incorporação de RB terem apresentado massas específicas menores que o cimento de referência.

### 5.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A curva granulométrica do cimento CP-V ARI, apresentada na figura 28 permitiu verificar uma deficiência no teor de material entre 1 e 5 micrômetros, que pode ser compensado pela incorporação de RBF, cuja curva granulométrica é apresentada na figura 31. Esta combinação se embasou na sobreposição gráfica das curvas de distribuição do tamanho das partículas do cimento e do RBF, apresentadas na figura 40, onde se observa a contribuição da adição de RBF, com ganho da fração deficiente no cimento entre 1e 5 micrômetros.

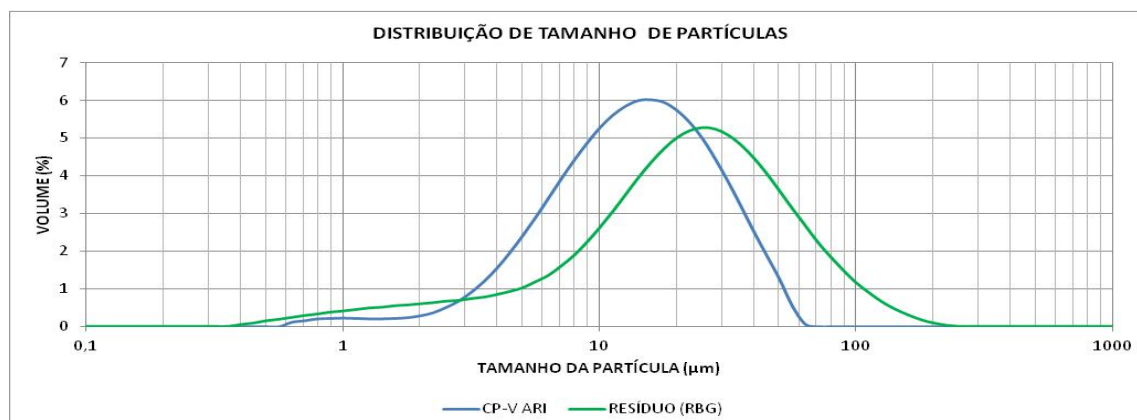
**Figura 40** – Distribuição do tamanho das partículas do cimento CP-V ARI e do RBF



Fonte: O autor (2012)

Já a contribuição obtida com a adição de RBG ao cimento, muito embora incorporasse certo teor de finos à mistura, como pode ser visto na figura 41, pelo fato de ambos se localizarem na mesma faixa granulométrica, não resultou em ganho considerável na resistência mecânica.

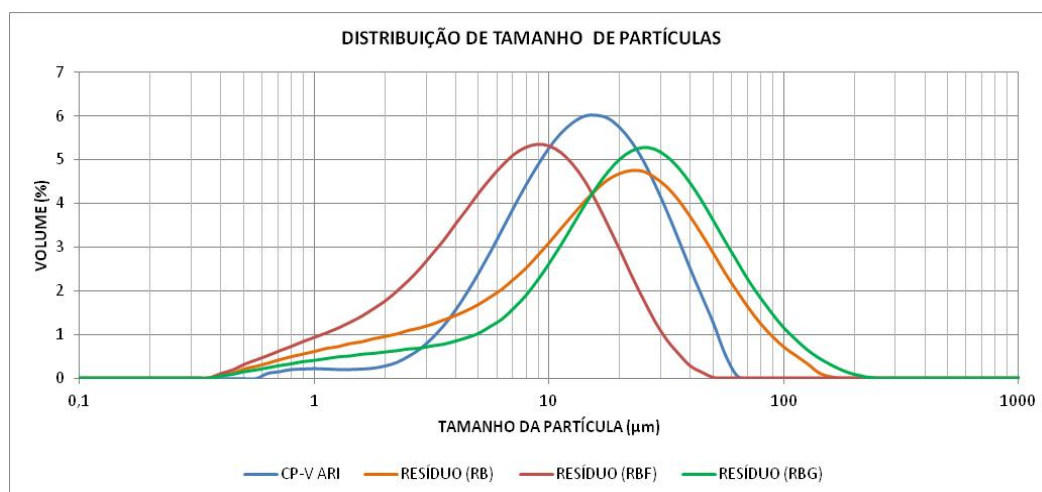
**Figura 41** – Distribuição do tamanho das partículas do cimento CP-V ARI e do RBG



Fonte: O Autor, 2012

Observando as curvas de distribuição do tamanho das partículas de cada um dos materiais estudados, apresentadas na figura 42, percebe-se que, muito embora todas as amostras de RB contribuam para o aumento do teor de finos do cimento CP-V ARI até 5 micrômetros, o RB *in natura* e o RBG acentuam a presença de partículas de maiores dimensões, na faixa de 10 a 100 micrômetros.

**Figura 42** – Curvas de distribuição discreta das partículas do Cimento CP-V ARI, do RB *in natura*, do RBG e do RBF



Fonte: O Autor (2012)

Do ponto de vista do empacotamento, a fração fina do RB (RBF) garantiu uma maior continuidade granulométrica ao cimento resultante desta combinação, fator que levou a se esperar um melhor desempenho mecânico da pasta endurecida evidenciado pelo aumento da resistência mecânica.

Foi observado que a utilização do RB *in natura* e da fração grossa (RBG), cujas curvas de distribuição discreta das partículas se posicionam mais à direita na figura 42, por serem materiais que apresentam partículas mais grossas, não trouxeram benefícios consideráveis ao perfil granulométrico do produto. Esta constatação foi um dos indícios que levou à opção por utilizar a fração fina do RB, (RBF) na etapa seguinte do estudo, o que se confirmou no ensaio de resistência à compressão do cimento.

### 5.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A composição mineralógica do resíduo basáltico (RB) e das frações grossa (RBG) e fina (RBF), determinadas por meio de difração de Raios-X, não se alterou e permitiu, observando-se a constituição das frações, e não ter havido a ocorrência de segregação decorrente da moagem e peneiramento. Isto poderia ter ocorrido em virtude da possibilidade da presença de minerais mais friáveis, mais susceptíveis à cominuição mecânica, na fração de 1-10 micrômetros (RBF). Os resultados revelaram não haver divergência na composição das frações, conforme demonstrado na figura 39, em função da finura das amostras.

### 5.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DOS CIMENTOS COM RB

A ruptura dos corpos de prova de argamassa para avaliação da resistência mecânica à compressão dos cimentos, conforme dados da tabela 14 e das curvas de resistência mostradas na figura 34, revelaram que a adição de RBF provocou uma queda de 4,2% na resistência mecânica à compressão em relação ao cimento de referência, para incorporação de teores de até 1%. Para valores maiores que 1%, até 2,5%, verificou-se um ganho de resistência de 4,3%. Para teores de 5%, a resistência do cimento produzido foi praticamente a mesma que a do cimento de referência, com uma pequena queda de 0,25%. Para teores maiores que 5%, até 10%, ocorreu uma queda de 10,5% e, finalmente, para teores maiores que 10%, até 15%, a queda foi de 7,3% em relação ao cimento de referência, conforme demonstra a tabela 15.

No que diz respeito ao RBG, verificou-se que sua adição provocou uma queda de 7,7% na resistência mecânica à compressão em relação ao cimento

de referência, para incorporação de teores de até 5%. Para valores maiores que 5%, até 10%, verificou-se uma queda de resistência de 8,8%. Para teores entre 10% e 15%, a resistência do cimento apresentou uma queda de 10,8% em relação ao cimento de referência, como mostra a tabela 16.

**Tabela 15** – Resistência à compressão aos 7 dias dos cimentos CPV-ARI com RBF

Teor de RBF	Varição da Resistência do cimento em relação ao teor de RBF anterior	Comparação com o Cimento de Referência (39,8 MPa)
até 1%	Queda na resistência de 4,2%	Queda de 4,2%
Entre 1,0 e 2,5%	Ganho na resistência de 8,2%	Ganho de 4,3%
Teor 5%	Queda na resistência de 3,7%	Queda de 0,25%
> 5,0% e 10%	Queda na resistência de 11,5%	Queda de 10,5%
> 10% até 15%	Ganho na resistência de 3,6%	Queda de 7,3%

Fonte: O autor (2012)

**Tabela 16** – Resistência à compressão aos 7 dias dos cimentos CPV-ARI com RBG

Teor de RBG	Varição da Resistência do cimento em relação ao teor de RBG anterior	Comparação com o Cimento de Referência (39,8 MPa)
até 5%	Queda na resistência de 8,4%	Queda de 7,7%
> 5,0% e 10%	Queda na resistência de 1,1%	Queda de 8,8%
> 10% até 15%	Queda na resistência de 2,2%	Queda de 10,8%

Fonte: O autor (2012)

A tabela 17 apresenta os percentuais de variação da resistência mecânica dos cimentos ensaiados, comparando os cimentos com o RBF e com RBG.

**Tabela 17** – Comparação da resistência de cimento com iguais teores de RBF e RBG

Teor de RBG	Resistência à compressão dos cimentos com Resíduos (MPa)		
	RBF	RBG	Varição RBF/RBG(%)
1,0%	38,2	39,2*	-3%
2,5%	41,5	38,3*	8%
5,0%	39,7	36,7	8%
10,0%	35,6	36,3	-2%
15,0%	36,9	35,5	4%

\* Valores obtidos graficamente

Fonte: O autor (2012)

Como não foram estudados teores de RB intermediários aos apresentados nas curvas da figura 34, optou-se pelo teor de 2,5% de RBF, tendo em conta os valores estudados neste trabalho e os resultados de resistência mecânica. É importante ser observada a tendência das curvas obtidas, considerando-se que as variações verificadas podem ser atribuídas a eventuais interpretações estatísticas, em função do número de amostras utilizadas.

A contribuição do grau de empacotamento à resistência mecânica, em função da maior continuidade granulométrica decorrente da adição da fração fina do RB (RBF), pode ser apontada como um dos fatores responsáveis pelo melhor desempenho mecânico da pasta endurecida, assegurando um aumento na resistência mecânica à compressão.

Houve uma queda da resistência mecânica dos cimentos produzidos com a fração grossa (RBG) em relação ao cimento de referência, como pode ser constatado na tabela 14. Acredita-se que isto se deva ao fato de se tratarem de materiais constituídos por partículas de dimensões maiores que o cimento, como foi observado nas curvas de distribuição do tamanho das partículas já analisadas.

Apenas o cimento produzido com a incorporação da fração mais fina do RB (RBF) apresentou resistência mecânica próxima a do cimento de referência.

Ao se analisar o desempenho mecânico do cimento com RBF, constatou-se que, a partir do ponto de resistência máxima atingida por este cimento, correspondendo à resistência de 41,5 MPa, ocorreu uma queda na resistência até o teor de 10% de RBF, correspondente a 35,6 MPa, o que pode ser constatado na figura 34. A partir deste teor de 10%, ocorreu um incremento na resistência até o valor máximo de incorporação estudado de 15%, correspondendo a uma resistência de 36,6 MPa, segundo dados da tabela 14.

Desta forma, a única situação em que o desempenho do cimento de referência foi superado foi no CPV-ARI + 2,5% RBF (1-10µm), cujo valor da resistência atingida, de 41,5 MPa, confirmou o resultado esperado, em função da análise granulométrica e do grau de empacotamento dos materiais.

## 5.5 ANÁLISE DA PASTA DE CIMENTO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O alto contraste verificado nos contornos das imagens obtidas na microscopia eletrônica de varredura (MEV) decorre da alta dependência da emissão de elétrons secundários com pequenas inclinações da amostra.

A análise das amostras de cimento Portland com adição de RB, através do MEV, permitiu constatar a homogeneidade da dispersão das partículas basálticas na matriz de cimento Portland, bem como determinar a dimensão das partículas que formam o compósito. Foi possível ainda, observar a morfologia e a distribuição das partículas de RB na matriz de cimento Portland, verificando-se a presença de espaços vazios na estrutura da pasta, como mostram as figuras 35 e 36

As imagens revelaram a presença de grãos de basalto incorporados à matriz cimentícia, conforme ilustra a figura 35, na qual se identifica a ocorrência de um grão de RBF à esquerda na imagem e uma concentração de produtos de hidratação C-S-H na região à direita da mesma. A partícula de RB foi identificada mediante a realização de uma micro-análise por meio de sonda EDS anexa ao MEV. Por meio desta, foi possível obter a curva apresentada na figura 37, onde se distinguem os picos dos elementos constituintes do basalto. Observa-se um pico intenso referente à presença de ouro (Au) utilizado para recobrir a amostra submetida ao MEV. O segundo pico mais intenso corresponde ao silício, material predominante no basalto, o que apresenta em torno de 50% de  $\text{SiO}_2$ , conforme dados da tabela 3.

Concluiu-se por meio das imagens obtidas que a incorporação de partículas de RBF ao cimento Portland CP-V ARI, nas dimensões da ordem de 1 a 10 micrômetros, resultou na ocorrência de pontos de nucleação, ou seja, os mesmos serviram de suporte para o desenvolvimento de produtos da hidratação do cimento, o que se traduziu num ganho de resistência mecânica. Muito embora a pasta utilizada para os ensaios com MEV tenha sido constituída por 15% de RBF, de forma a facilitar a visualização do fenômeno, os resultados obtidos nos ensaios mecânicos com a argamassa utilizando estes cimentos revelaram que o teor mais favorável de incorporação de RBF para a resistência à compressão foi de 2,5%.

## 5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que:

A partir da avaliação técnica do desempenho do RB incorporado à pasta de cimento, foi verificado que:

- A fração mais adequada para substituição ao cimento é a fração mais fina (RBF);
- Não foi constatada, por difração de Raios-X, variação na composição das frações de RB em função da redução da dimensão das partículas por cominuição;
- O teor de RBF que apresentou melhores resultados foi o de 2,5%;
- A contribuição à resistência mecânica deveu-se, em parte, ao empacotamento obtido pela adequação da curva granulométrica do cimento;
- O fenômeno da nucleação desempenhou um papel importante na elevação da resistência mecânica à compressão dos cimentos ensaiados;
- O emprego do resíduo de basalto na fabricação de cimento revelou-se uma alternativa bastante favorável, dos pontos de vista econômico e ambiental.

A visualização da presença dos produtos de hidratação do cimento sobre a superfície das partículas de resíduos basálticos finos (RBF), como mostram as figuras 35, 36 e 38, confirmam ocorrência de pontos de nucleação sobre a partícula do RBF, contribuindo para um ganho na resistência mecânica, o que confirma a hipótese estabelecida de que a adição do RB modifica a microestrutura do material em decorrência dos efeitos de empacotamento e nucleação, garantindo as propriedades mecânicas da pasta de cimento.

Apesar das normas brasileiras não fazerem referências ao uso de filer de basalto na fabricação de cimento Portland, limitando apenas o teor de filer calcário em 10%, os resultados obtidos revelaram aspectos promissores desta prática, indicando ser possível a utilização de teores mais elevados deste resíduo.

A avaliação da viabilidade econômica revelou que:

A possibilidade de incorporação do RB em substituição a parte do cimento, no caso particular de pavimentação, pode garantir uma economia considerável de materiais e uma redução significativa de custos.

Exemplificando, no caso da execução da base de uma rodovia utilizando brita graduada tratada com cimento, supondo-se uma extensão de 50 quilômetros de pista dupla, com duas faixas de rolamento de 3,7 metros e acostamentos laterais de 2,5 metros, totalizando 20 metros de largura, ter-se-ia uma área total de 1 milhão de metros quadrados. Adotando-se uma espessura da base de 30 centímetros, o total de material, englobando brita graduada e cimento, seria de 300 mil m<sup>3</sup>. Considerando a massa unitária da brita graduada compactada com rolo igual a 2.500 kg/m<sup>3</sup>, a massa total de material seria de 750 mil toneladas de brita graduada.

Como o consumo de cimento corresponde a 4,5% da massa de brita, isto corresponderia a 33.750 toneladas de cimento. De acordo com a proposição deste trabalho, ou seja, a substituição de 2,5% da massa de cimento por RBF, isto representaria uma redução de 843 toneladas de cimento, correspondendo a 16.785 sacos. Considerando o valor comercial de um saco de cimento R\$ 25,00, isto representaria uma redução de cerca de 420 mil reais.

É interessante observar que este valor, considerando o valor da hora trabalhada de um operário da ordem de R\$ 3,00/h e o valor mensal trabalhado por operário igual a 220 horas, corresponderia a uma economia aproximada de 17 funcionários / ano. Vale observar que esta economia, diante da possibilidade do emprego de teores maiores de 2,5% de RBF, seria diretamente maior.

Muito embora, em função dos procedimentos realizados, este trabalho tenha um caráter qualitativo, a constatação do fenômeno da nucleação por meio dos resultados obtidos nos ensaios abre novas perspectivas para o emprego deste resíduo na produção de cimento Portland, ou na adição ao concreto, contribuindo para o desenvolvimento de uma nova política voltada para a eco eficiência.

Quanto à questão ambiental:

Outro aspecto a ser destacado é a questão da sustentabilidade envolvida no processo de fabricação de cimento, permitindo a redução da emissão de CO<sub>2</sub> em função da possibilidade da substituição parcial de clínquer Portland por resíduo de britagem. A produção de uma tonelada de clínquer dá origem à emissão de uma tonelada de CO<sub>2</sub>. Considerando-se que no processo de obtenção do cimento Portland, esta emissão acaba sendo diluída na proporção aproximada de 800kg de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de cimento produzido, uma vez que, normalmente, os

cimentos apresentam um teor de incorporação de adições que varia em função do tipo de cimento produzido. Desta forma, a possibilidade de usar o RB em substituição à parte da massa de cimento utilizada na produção de concreto, traz como consequência uma interferência direta nestes índices, contribuindo com a eco eficiência. Isto vem confirmar a hipótese proposta no início do trabalho.

Quanto aos custos operacionais envolvidos no processo de gestão do RB:

Destaca-se ainda, o baixo custo operacional para se coletar e estratificar os resíduos de basalto, o que leva à criação de um novo mercado para a comercialização dos mesmos, agregando assim um valor comercial ao material originalmente prejudicial ao meio ambiente e sem aplicabilidade técnica. Finalmente, destaca-se a possibilidade de constituição de uma nova fonte de renda junto às empresas mineradoras.

Concluindo, considera-se altamente promissor o emprego do RB em misturas para a produção de cimentos e como adição à concretos em geral.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como a evolução da resistência do cimento à compressão com diferentes teores de RBF e RBG foi representada nas curvas da figura 34 através de segmentos de reta, sugere-se a verificação do desempenho do cimento com teores de adições intermediários aos valores estudados.

Sugere-se também, um estudo da influência desta adição na trabalhabilidade do concreto, bem como, na sua capacidade de retenção de água e na retração destas composições.

Outro aspecto que merece estudos posteriores é a verificação da evolução da resistência mecânica de cimentos contendo teores de RBF superiores a 10% e uma verificação da possibilidade de utilizar frações contendo teores de 5 a 10% de RBG visando a adequada destinação do resíduo.

Sugere-se o desenvolvimento de estudos envolvendo modelos matemáticos que possam contribuir para o avanço das pesquisas nesta área de produção de cimentos especiais.

Realizar um estudo de desempenho em brita graduada, utilizada em base de pavimento (BGTC), tratada com cimento com a substituição parcial por RB.

A indústria de cimento deve se adequar aos avanços em relação à exploração de fontes de novas matérias primas, como também deve repensar a questão de novas matrizes energéticas no fabrico do cimento, como a biomassa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÍTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Pini, São Paulo, 2000.

ANDRADE, P. A. de. **Os caminhos do comprometimento**. In: REVISTA RECUPERAR – INSTITUTO DE PATOLOGIAS DA CONSTRUÇÃO, ed. 63, Janeiro/Feveireiro de 2005, Rio de Janeiro.

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - www.abcp.org.br – 2013.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5733 - Cimento Portland de Alta resistência - especificações** - Rio de Janeiro. 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 5736 - Cimento Portland pozolânico** - Rio de Janeiro. 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 7122 - Resistência a tração do concreto por compressão diametral** - Rio de Janeiro. 1994.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211 Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215 Cimento Portland - determinação da resistência a compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653 - Matérias Pozolânicos - Especificação** - Rio de Janeiro. 1992.

ANDREASEN E ALFRED - **The influence of alfred and andreasen models on the microstructure and green density of ceramic compacts obtained by slip casting and dry pressing** - Dissertação Fernando dos Santos Ortega, Rafael Giuliano Pileggi, Pilar Sepúlveda, Victor Carlos Pandolfelli - Departamento de Engenharia de Materiais, DEMa-UFSCAR – 1997.

BAUER, L.F., **Materiais de construção 1**. 4.ed. Rio de Janeiro, Brasil, 1979.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito a carbonatação**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CEMBUREAU, **The European Cement Association** (Representative organisation of the cement industry in Europe), 2012.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente - **Resolução 237/97, 19/12/97, Regulamenta os aspectos de licenciamento ambiental estabelecidos na Política Nacional do Meio Ambiente**. 1997.

\_\_\_\_\_. **Resolução 307/02, 05/07/02, Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. 2002.

\_\_\_\_\_. Resolução 001/86, 23/01/86, **Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes para o Relatório de Impacto Ambiental-RIMA** - Alterada pelas resoluções nº 11, de 1986, nº 5, de 1987, e nº 237, de 1997.

COUTINHO, A de Sousa, **Fabrico e propriedades do betão**, Volume 1, LNEC, 1988.

ÇOPUROGLU, O., et al . **Mineralogy, geochemistry and expansion testing of an alkalireactive basalt from western Anatolia, Turkey. Materials Characerization**. V. 60, n.7, p. 756-766. Julho 2009.

CUCHIERATO, G. **Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico**. 201 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização**. Edição G. C. Isaia. São Paulo: V1. Ibracon, 2005.

DAL RI, M., **Efeitos da adição da cal hidratada em concretos com altos teores de adição mineral na penetração de cloretos e na solução aquosa dos poros do concreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coppe, Rio de Janeiro-RJ, 2005, 259 p.

FRANÇA, E.P. - **Tecnologia básica do concreto**, 2002.

FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

FUJIMURA, F; Soares, L; Hennies, W.T.; Silva, M.A.R.; Environmental issue and pofitable uses of stone quarry fines. In: 4th International Conference on Environmental Issues and Waste Manegement in Energy and Mineral Production. **Proceedings SWEMP´96**, v. 2, Caligari, Itália, 959-966. 1996.

FURQUIM, Paulo Ricardo de Souza. **Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais**, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

GARCIA, Ana Saggioro. Hegemonia e imperialismo: caracterizações da ordem mundial capitalista após a Segunda Guerra Mundial. **Contexto int.**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 1, June, 2010.

GASPAR, Ricardo Carlos. O avanço da internacionalização no capitalismo contemporâneo: um ensaio de interpretação crítica da globalização. **PESQUISA & DEBATE**, SP, v. 10, n. 2, p. 16, 1999.

HASPARYK, N.P.; de Andrade, M.A.S.; Muniz, F.C; Liduário, A.S.; Bittencourt, R.M. de Andrade, W.P., **Estudo da influência de adições na durabilidade e microestrutura do concreto**. In: Instituto Brasileiro do Concreto. 44º congresso brasileiro. Anais. 2002. p. 1-16.

HEIKAL, M.; EL-DIDAMONY, H.; MORSY, M. S. Limestone-filled pozzolan concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 11, p. 1827-1834, 2000.

HOPPE FILHO, J. **Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Site do Governo Federal da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2010. <[http://www.ipea.gov.br/bd/pdf/Livro\\_BD\\_vol2.pdf](http://www.ipea.gov.br/bd/pdf/Livro_BD_vol2.pdf)> . Consulta em 20/12/12.

ISAIA, G. C. **Ação física e pozolânica das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto de alta desempenho**. XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, Punta del Este, 2000.

ISAIA, G. C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. São Paulo, 1995. 280 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C., **Pesquisa sobre o cobrimento da armadura das armaduras de concreto: revisão sobre a estrutura dos poros e mecanismos de transporte**. Santa Maria, 2001. Polígrafo. 32p.

ISAIA, G. C., GASTALDINI, A. L. G., MORAES, R. C., **The physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete**. In: Sustainable Construction Into The Next Millenuim Environmentally-Friendly And Innovative Cement Based Materials, 2000, João Pessoa. Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction into the next millennium, João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2000. v.1, p. 229-244.

JOHN, V.M. , **Reciclagem de resíduos sólidos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência), São Paulo: EPUSP. 102 p. 2000.

KLEIN, N.S., CARBONARI, B.T. e GUIZILINI, R.P. **Estudo do agregado miúdo para produção de concreto auto-adensável: substituição da areia natural por areia de britagem**. In: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2008, Fortaleza. Anais... Fortaleza, 2008.

LEMAITRE apud KORKANÇ, M.; TUGRUL, A. Evaluation of selected basalts from the point of alkali-silica reactivity. **Cement and a concrete research**, v. 35, n. 3, p. 505-512, mar. 2005.

LOPES, G.A., **Cimento Portland, propriedades e fabricação**, 1998.

MEHTA, P. K., Advancements in concrete technology. **Concrete International**, v.21, n. 6, p. 69-76, jun. 1999.

MEHTA, P.K. Reducing the environmental impact of concrete. Concrete can be durable and environmentally friendly. **Concrete international**, p. 61-66, 2001.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, J. P. M., **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. NEVILLE, A. Propriedades do concreto. São Paulo: Pini, 1997, A.M.Neville, Propriedades do concreto, 2. ed. Pini, São Paulo, 1997

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. New Jersey: Prentice Hall, 1981.

MINEROPAR. Minerais do Paraná S.A. **Diagnóstico preliminar dos impactos ambientais da mineração no Paraná**. Curitiba, 2001. 207p.

MORAES, R. C., **Efeitos físicos e pozolânicos das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

MOREIRA, Helion França. **O desenvolvimento sustentável no contexto do setor mineral brasileiro**. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2003.

NEVILLE, A.M., **Propriedades do concreto**, 2. ed. S. Paulo: PINI, 1997.

NEVILLE, A.M., **The question of concrete durability**: We can make good concrete today. *Concrete International*. V. 22, n. 7, p. 21-26, 2000.

NIELSEN, U, Sandberg, P, Folliard, K, **Influence of mineral admixtures on the transition zone in concrete**. In: Rilen International Conference on Interfaces in Cimentitious Composites, 1992, Toulouse. Proceedings. London: E&FN Spon, p. 65-70 (Rilen Proceedings 18) , 1993.

NORMAS DO MERCOSUL 23 - **Cimento Portland**: determinação de massa específica. NM 23 - Uruguai, 2000.

OHASHI, T. **Areia de brita com alto conteúdo de microfinos na produção de concretos de cimento Portland**. Rev., 2001.

OLIVEIRA, C. T. A. **Água do poro de pastas de cimento de escória**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

OLIVEIRA, Marcos Feliciano de. **Efeitos da adição de finos de basalto na pasta de cimento Portland**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2011.

PAULON, V.A., **A Microestrutura do concreto convencional**. In: *Concreto, Ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 584-604

PENA, D.C. **Avaliação da Expansibilidade da Escória de Aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para Pavimentação**. Dissertação M.Sc., PPGEC / UFES, Vitória, ES, Brasil, 2004

PILEGGI, R.G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. 2001. Tese (Doutorado). 187f. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001

P.LAWRENCE, M. Cyr, E.Ringot, Mineral Admixtures in mortars, effect of inert materials on short-term hydration, **Cem. Concr. Res.**, v. 33,n. 12, p. 1939-1947, 2003.

REZENDE, Márcio Marques, LA SERNA, Humberto Almeida de; **Agregados para a Construção Civil**. p. 602-635.Disponível em: <<http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/07/DNPM2009.pdf>, 2009>.

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.

SÁ, Fabricio Gomes de. **Síntese e caracterização de compósitos de cimento Portland modificados com PZT**. Mestrado (Ciências em Materiais para Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá. 2009

SANCHEZ, E. Aspectos gerais e reológicos do concreto de alta resistência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 39., 1997, São Paulo. **Anais...** 2 v,v. 2, p.643-660. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, 1997

SANTI, A. M. M. & SEVÁ FILHO, A. O. Combustíveis e riscos ambientais na fabricação do cimento. In: II Encontro Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade – ANPPAS, Campinas, 2004.

SBRIGHI Neto, C.; **A Influência da areia britada e de seus finos em algumas propriedades do Betão**. Mestrado (Engenharia Civil) - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, Portugal, 1975

SILVEIRA A.A., Ferreira A.A., Dal Molin, D. **A cinza da casca do arroz como adição mineral**. In: Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil. USP, São Paulo, 1996, p.39 a 45.

SOARES, L.; Mendes, K. da S. Aproveitamento de finos de pedreiras. **Rev. Brasil Mineral**, n. 179, p.38-45. 1999.

SPERB, J. E. K., **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003,

STUMPP, M. J., **Carbonatação de concretos com altos teores de adições minerais e cal hidratada**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003

TÉCHNE Revista. **Concreto sustentável**. Entrevista com Povindar Kumar Mehta. *Téchne*, nº 139, p.24-27, 2008

TERRA, L.E.M. (2000) **Finos de pedreira para confecção de concreto estrutural - práticas recomendadas**. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil: Práticas Recomendadas, 3, São Paulo, 2000.

VAGHETTI, M. A. O. **Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

VAGHETTI, M. A. O. **Estudo da corrosão do aço, induzida por carbonatação, em concretos com adições minerais,** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005, 286 p.

VENQUIARUTO, S. D. **A influência da finura e do teor de adições minerais na carbonatação do concreto.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

VIEIRA, F. M. P., **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003

WINCK, M. L., **Efeitos físicos e pozolânicos de adições minerais sobre a penetração de cloretos no concreto.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002

## **ANEXOS**

## ANEXO A

## I, II, III e IV



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

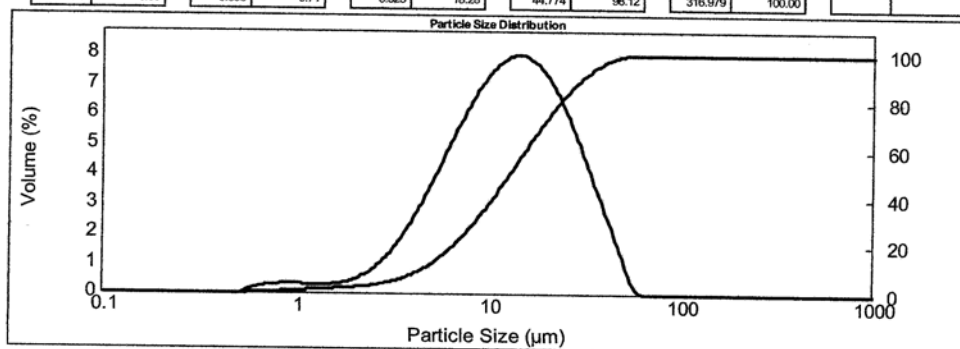
Laboratório de Caracterização Tecnológica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.poli.usp.br  
Tel: 11 3091-5151 Fax: 11 3091-6037 e-mail: lct@lct.poli.usp.br



## RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

<b>Certificado:</b> 517-12 MAL	<b>POP:</b>	<b>Data da medida:</b> 29 June 2012 10:59:06	
<b>Cliente:</b> RIO TIBAGI SERVIÇOS DE OPERAÇÕES E APOIO ROD. LTDA	<b>Analista:</b> Andre	<b>Data da análise:</b> 29 June 2012 10:59:08	
<b>Amostra:</b> Cimento CPV-ARI	<b>Fonte de resultados:</b> Edited		
<b>Notas:</b> Vel. Bomba: 2500 rpm Meio de dispersão: álcool isopropílico Ultrassom: 1 min.			
<b>Código I.R.:</b> Cimento	<b>Amostrador:</b> Hydro 2000MU (A)	<b>Tipo de análise:</b> General purpose	<b>Sensitividade:</b> Normal
<b>I.R. da partícula:</b> 1.680	<b>Absorção:</b> 0.01	<b>Faixa de tamanho:</b> 0.020 to 2000.000 $\mu\text{m}$	<b>Obscurecência:</b> 7.15 %
<b>Dispersante:</b> sopropyl alcohol	<b>I.R. do dispersante:</b> 1.377	<b>Resíduo:</b> 1.283 %	<b>Result Emulation:</b> Off
<b>Concentração:</b> 1.0079 %Vol	<b>Span :</b> 2.034	<b>Uniformidade:</b> 0.627	<b>Tipo de distribuição:</b> Volume
<b>Área superf. espec.:</b> 1.712 $\text{m}^2/\text{g}$	<b>D[3,2]:</b> 8.433 $\mu\text{m}$	<b>D[4,3]:</b> 15.745 $\mu\text{m}$	
<b>d(0,1):</b> 4.584 $\mu\text{m}$	<b>d(0,5):</b> 13.071 $\mu\text{m}$	<b>d(0,9):</b> 31.168 $\mu\text{m}$	

Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	0.94	7.096	22.20	50.238	99.38	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	1.16	7.962	26.61	56.368	99.93	369.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	1.37	8.934	31.47	63.246	100.00	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	1.58	10.024	36.74	70.963	100.00	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	1.80	11.247	42.34	79.621	100.00	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	2.04	12.619	48.18	89.337	100.00	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	2.33	14.159	54.17	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	2.70	15.887	60.18	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	3.21	17.825	66.12	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	3.89	20.000	71.85	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	4.81	22.440	77.26	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	6.02	25.179	82.24	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	7.58	28.251	86.68	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.12	4.477	9.55	31.696	90.52	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	0.28	5.024	11.97	35.596	93.71	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	0.49	5.637	14.87	39.905	96.23	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	0.71	6.325	18.28	44.774	98.12	316.979	100.00		



Prof. Dr. Henrique Kahn  
Coordenador do LCT

Dra. Maria Manuela Tassinari  
Pesquisadora do LCT-EPUSP

M.Sc. André Borges Braz  
Pesquisador do LCT-EPUSP



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



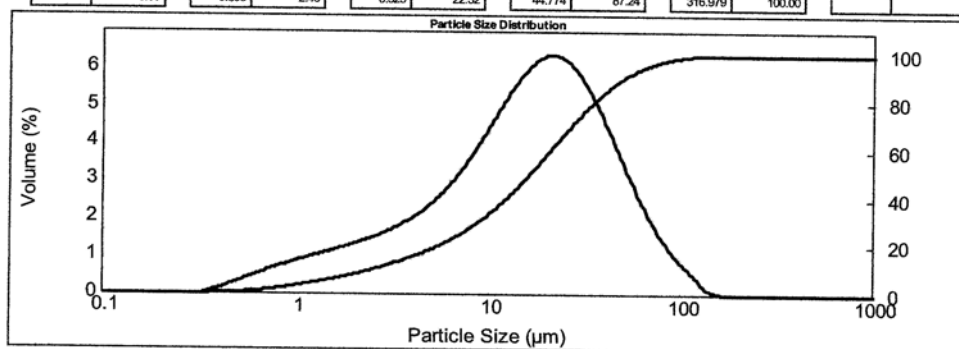
### RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

**Certificado:** 515-12 MAL **POP:** **Data da medida:** 29 June 2012 10:26:30  
**Cliente:** RIO TIBAGI SERVIÇOS DE OPERAÇÕES E APOIO ROD. LTDA **Analista:** **Data da análise:** 29 June 2012 10:26:31  
**Amostra:** Resíduo de Britagem - Coleta do Filtro de Mangas **Fonte de resultados:** Edited  
**Notas:**  
Vel. Bomba: 2500 rpm  
Meio de dispersão: água deionizada Dispersante: calgon  
Ultrassom: 1 min.

**Código I.R.:** TFD **Amostrador:** Hydro 2000MU (A) **Tipo de análise:** General purpose **Sensitividade:** Normal  
**I.R. da partícula:** 2.593 **Absorção:** 0.01 **Faixa de tamanho:** 0.020 to 2000.000  $\mu\text{m}$  **Obscurecência:** 12.07 %  
**Dispersante:** Water **I.R. do dispersante:** 1.330 **Resíduo:** 0.707 % **Result Emulation:** Off

**Concentração:** 0.0094 %Vol **Span :** 2.880 **Uniformidade:** 0.903 **Tipo de distribuição:** Volume  
**Área superf. espec.:** 0.976  $\text{m}^2/\text{g}$  **D[3,2]:** 6.150  $\mu\text{m}$  **D[4,3]:** 22.473  $\mu\text{m}$   
**d(0.1):** 2.509  $\mu\text{m}$  **d(0.5):** 16.511  $\mu\text{m}$  **d(0.9):** 50.053  $\mu\text{m}$

Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %	Size ( $\mu\text{m}$ )	Vol Under %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	3.07	7.096	24.59	50.238	90.09	355.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	3.75	7.962	27.10	56.368	92.49	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	4.47	8.934	29.90	63.246	94.48	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	5.26	10.024	33.00	70.963	96.08	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	6.09	11.247	36.42	79.621	97.33	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	6.99	12.619	40.15	89.337	98.29	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	7.94	14.159	44.19	100.237	99.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	8.95	15.887	48.50	112.468	99.52	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	10.04	17.825	53.04	126.191	99.85	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.07	2.825	11.19	20.000	57.72	141.589	99.97	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.18	3.170	12.42	22.440	62.47	158.866	100.00	1124.883	100.00
0.071	0.00	0.502	0.39	3.557	13.75	25.179	67.20	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.66	3.981	15.18	28.251	71.79	200.000	100.00	1415.862	100.00
0.089	0.00	0.632	1.00	4.477	16.73	31.696	76.17	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	1.42	5.024	18.42	35.566	80.25	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	1.91	5.637	20.28	39.905	83.95	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	2.46	6.325	22.32	44.774	87.24	316.979	100.00		



Prof. Dr. Henrique Kahn  
Coordenador do LCT

Dra. Maria Manuela Tassinari  
Pesquisadora do LCT-EPUSP

M.Sc. André Borges Braz  
Pesquisador do LCT-EPUSP



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



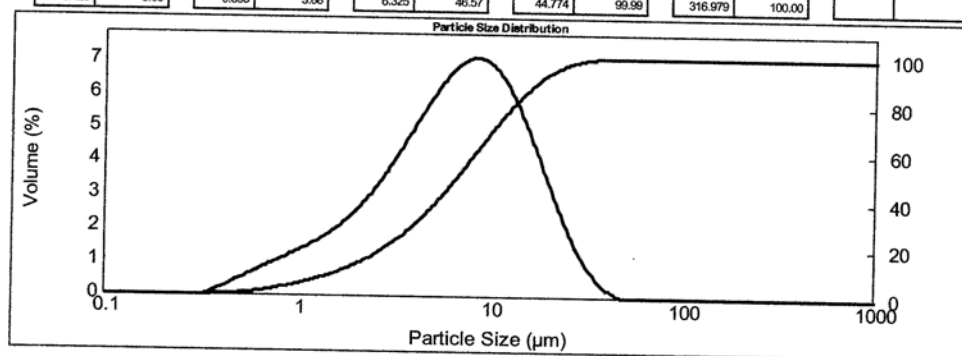
### RESULTADOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

**Certificado:** 516-12 MAL **POP:** **Data da medida:** 29 June 2012 10:43:05  
**Cliente:** RIO TIBAGI SERVIÇOS DE OPERAÇÕES E APOIO ROD. LTDA **Analista:** **Data da análise:** 29 June 2012 10:43:06  
**Amostra:** Resíduo "Sedimentado" 1 <resíduo<10 µm **Fonte de resultados:** Edited  
**Notas:**  
Vel. Bomba: 2500 rpm  
Meio de dispersão: água deionizada Dispersante: calgon  
Ultrassom: 1 min.

**Código I.R.:** TFD **Amostrador:** Hydro 2000MU (A) **Tipo de análise:** General purpose **Sensitividade:** Normal  
**I.R. da partícula:** 2.593 **Absorção:** 0.01 **Faixa de tamanho:** 0.020 to 2000.000 µm **Obscurecência:** 9.80 %  
**Dispersante:** Water **I.R. do dispersante:** 1.330 **Resíduo:** 0.431 % **Result Emulation:** Off

**Concentração:** 0.0046 %Vol **Span :** 2.390 **Uniformidade:** 0.742 **Tipo de distribuição:** Volume  
**Área superf. espec.:** 1.59 m<sup>2</sup>/g **D[3,2]:** 3.780 µm **D[4,3]:** 8.611 µm  
**d(0.1):** 1.655 µm **d(0.5):** 6.835 µm **d(0.9):** 17.991 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	4.61	7.096	51.69	50.238	100.00	365.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	5.64	7.962	56.97	56.368	100.00	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	6.78	8.934	62.32	63.246	100.00	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	8.05	10.024	67.63	70.963	100.00	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	9.46	11.247	72.79	79.621	100.00	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	11.04	12.619	77.68	89.337	100.00	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	12.80	14.159	82.20	100.237	100.00	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	14.78	15.887	86.24	112.468	100.00	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	17.01	17.825	89.74	126.191	100.00	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.10	2.825	19.52	20.000	92.88	141.589	100.00	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.28	3.170	22.35	22.440	95.03	158.866	100.00	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.59	3.557	25.50	25.179	96.84	178.250	100.00	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	1.00	3.991	29.02	28.251	98.14	200.000	100.00	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	1.51	4.477	32.89	31.696	99.02	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	2.13	5.024	37.13	35.566	99.58	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	2.85	5.637	41.70	39.905	99.86	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	3.68	6.325	46.57	44.774	99.99	316.979	100.00		



Prof. Dr. Henrique Kahn  
Coordenador do LCT

Dra. Maria Manuela Tassinari  
Pesquisadora do LCT-EPUSP

M.Sc. André Borges Braz  
Pesquisador do LCT-EPUSP



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**

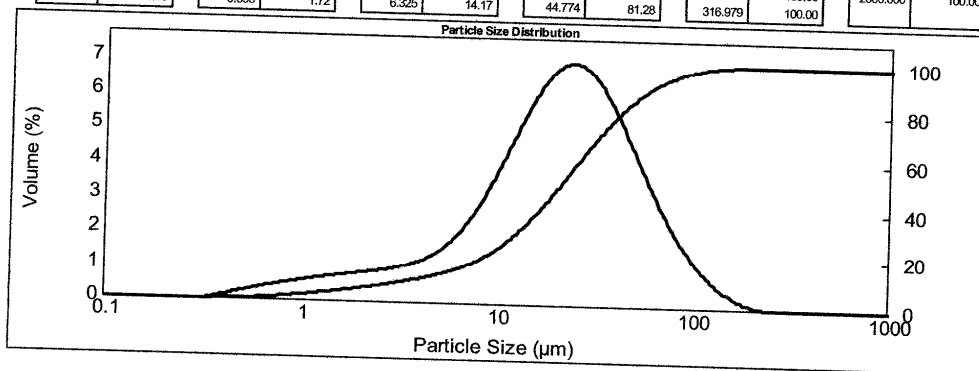
**Certificado:** 514-12 MAL **POP:** **Data da medida:** 29 June 2012 09:52:34  
**Cliente:** RIO TIBAGI SERVIÇOS DE OPERAÇÕES E APOIO ROD. LTDA **Analista:** Andre **Data da análise:** 29 June 2012 09:52:35  
**Amostra:** Resíduo "Sedimentado" 10<resíduo<100 µm **Fonte de resultados:** Edited

**Notas:**  
Vel. Bomba: 2500 rpm  
Meio de dispersão: água deionizada Dispersante: calgon  
Ultrassom: 1 min.

**Código I.R.:** TFD **Amostrador:** Hydro 2000MU (A) **Tipo de análise:** General purpose **Sensitividade:** Normal  
**I.R. da partícula:** 2.593 **Absorção:** 0.01 **Faixa de tamanho:** 0.020 to 2000.000 µm **Obscurecência:** 8.08 %  
**Dispersante:** Water **I.R. do dispersante:** 1.330 **Resíduo:** 0.260 % **Result Emulation:** Off

**Concentração:** 0.0084 %Vol **Span :** 2.679 **Uniformidade:** 0.839 **Tipo de distribuição:** Volume  
**Área superf. espec.:** 0.725 m²/g **D[3,2]:** 8.280 µm **D[4,3]:** 28.596 µm  
**d(0.1):** 4.169 µm **d(0.5):** 21.318 µm **d(0.9):** 61.280 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	2.13	7.096	15.78	50.238	84.88	356.656	100.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	2.58	7.962	17.67	56.368	88.01	399.052	100.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	3.07	8.934	19.91	63.246	90.69	447.744	100.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	3.58	10.024	22.54	70.963	92.92	502.377	100.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	4.13	11.247	25.59	79.621	94.76	563.677	100.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	4.70	12.619	29.09	89.337	96.24	632.456	100.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	5.30	14.159	33.04	100.237	97.39	709.627	100.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	5.93	15.897	37.40	112.468	98.28	796.214	100.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	6.60	17.825	42.12	126.191	98.93	893.367	100.00
0.056	0.00	0.399	0.05	2.825	7.29	20.000	47.13	141.589	99.39	1002.374	100.00
0.063	0.00	0.448	0.14	3.170	8.03	22.440	52.33	158.866	99.70	1124.683	100.00
0.071	0.00	0.502	0.29	3.557	8.81	25.179	57.61	178.250	99.88	1261.915	100.00
0.080	0.00	0.564	0.48	3.991	9.66	28.251	62.85	200.000	99.97	1415.892	100.00
0.089	0.00	0.632	0.72	4.477	10.59	31.696	67.93	224.404	100.00	1588.656	100.00
0.100	0.00	0.710	1.01	5.024	11.62	35.566	72.75	251.785	100.00	1782.502	100.00
0.112	0.00	0.796	1.34	5.637	12.81	39.905	77.22	282.508	100.00	2000.000	100.00
0.126	0.00	0.893	1.72	6.325	14.17	44.774	81.28	316.979	100.00		



Prof. Dr. Henrique Kahn  
Coordenador do LCT

Dra. Maria Manuela Tassinari  
Pesquisadora do LCT-EPUSP

M.Sc. André Borges Braz  
Pesquisador do LCT-EPUSP