

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**BENEFICIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE
RESÍDUOS GERADOS NA PRODUÇÃO DE BLOCOS
CERÂMICOS VISANDO À APLICAÇÃO COMO
ADIÇÃO POZOLÂNICA**

Igor Soares Pinheiro

Belo Horizonte
2008

Igor Soares Pinheiro

**BENEFICIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE
RESÍDUOS GERADOS NA PRODUÇÃO DE BLOCOS
CERÂMICOS VISANDO À APLICAÇÃO COMO
ADIÇÃO POZOLÂNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil.

Linha de pesquisa: Resíduos como Materiais de Construção Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Adriana Guerra Gumieri

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2008

P654b

Pinheiro, Igor Soares

Beneficiamento e caracterização de resíduos gerados na produção de blocos cerâmicos visando à aplicação como adição pozolânica.
[manuscrito] - MG / Igor Soares Pinheiro. – 2008.
152p., enc. : il.

Orientador: Adriana Guerra Gumieri

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.
Inclui bibliografia

1. Cerâmica (tecnologia) - Teses. 2. Engenharia Civil – Teses. I.
Gumieri, Adriana Guerra. II. Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia III. Título.

CDU: 666.3.7:624

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

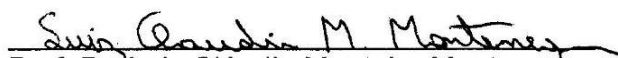
**BENEFICIAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS
NA PRODUÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS VISANDO À APLICAÇÃO
COMO ADIÇÃO POZOLÂNICA**

Igor Soares Pinheiro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Comissão examinadora:


Prof.^a Dr.^a Adriana Guerra Gurnieri
DEMC/UFMG – (Orientadora)


Prof. Dr. Luiz Cláudio Monteiro Montenegro
DEMIN/UFMG


Prof. Ph. D. Wander Luiz Vasconcelos
DEMET/UFMG

Belo Horizonte, 22 de fevereiro de 2008.

A Deus e a São Judas Tadeu,
por me manterem no caminho.

Aos meus pais, Jandyra e José,
pelo amor eterno, carinho e dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as oportunidades que me concede diariamente, permitindo que eu trilhasse o caminho que me trouxe até aqui.

Aos meus pais, Jandyra e José, por sempre acreditarem na educação como elemento de transformação, furtando-se de uma vida mais tranqüila e confortável, não medindo esforços para propiciar toda a ajuda necessária para a minha formação moral e acadêmica. Obrigado, sem vocês seria impossível.

Aos meus irmãos, Tarsus e Thiago, por acreditarem em mim, sempre apoiando e incentivando meus sonhos e projetos.

A Mariana, minha esposa, que sempre está ao meu lado, aturando meus momentos de mau humor e descrença na vida.

A minha orientadora, Prof.^a Adriana Gumieri, pela atenção e ajuda dispensada ao longo destes 2 anos, sempre acompanhando e contribuindo com seus conhecimentos para o engrandecimento da pesquisa.

Aos professores e servidores do Departamento de Engenharia de Minas, em especial aos Professores Luiz Cláudio Monteiro Montenegro e Paulo Roberto Gomes Brandão, e aos servidores Alberto e Isabel, pela cooperação, orientação e ajuda durante os ensaios de caracterização das amostras.

Ao Prof. Wander Luiz Vasconcelos, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de materiais, pelo auxílio e orientação durante os ensaios para determinação da área superficial específica.

Aos professores e servidores do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos da Procuradoria da República em Minas Gerais, pela compreensão e apoio durante este período.

A todos aqueles que vencem pelo esforço e que nunca desistem de aprender e de lutar por uma sociedade mais justa, mesmo diante das mazelas sociais do nosso país.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
LISTA DE UNIDADES	XIV
RESUMO.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA	20
1.2. OBJETIVOS.....	21
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
2. MATERIAIS POZOLÂNICOS.....	24
2.1. POZOLANAS NATURAIS	28
2.1.1. Vidros Vulcânicos	30
2.1.2. Tufos Vulcânicos.....	31
2.1.3. Sílicas Opalinas e Terras Diatomáceas.....	31
2.2. POZOLANAS ARTIFICIAIS.....	32
2.2.1. Argilas Calcinadas e Metacaulim	32
2.2.2. Cinzas Volantes	34
2.2.3. Sílica Ativa	36
2.2.4. Escória de Alto-Forno	38
3. CARACTERÍSTICAS E EFEITOS DAS ADIÇÕES POZOLÂNICAS SOBRE AS PROPRIEDADES DO CIMENTO PORTLAND	41
3.1. CIMENTO PORTLAND	41
3.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ATIVIDADE POZOLÂNICA.....	43
3.3. CIMENTO PORTLAND E CONCRETO COM ADIÇÕES POZOLÂNICAS.....	45
3.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE ADIÇÕES DE CERÂMICA VERMELHA MOÍDA	54
4. CERÂMICA VERMELHA	57
4.1. INDÚSTRIA CERÂMICA.....	57

4.2 MATÉRIAS-PRIMAS DA CERÂMICA VERMELHA	59
5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS	68
5.1 VISITA À OLARIA E AMOSTRAGEM	68
5.2. RESÍDUOS CERÂMICOS	69
5.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS	70
5.4 MOAGEM DOS RESÍDUOS	77
5.5 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO	86
5.5.1 Granulometria por elutriação (Cyclosizer Warman)	87
5.5.2 Granulometria a Laser	89
Considerações Sobre os Ensaios de Granulometria	94
5.5.3 Densidade (Picnômetro a Gás)	94
5.5.4 Área Superficial Específica	95
5.5.5 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X	97
5.5.6 Difração de Raios-X	98
5.5.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microanálise (EDS)	100
5.5.8 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland	112
5.5.9 Índice de Atividade Pozolânica em Cimento Portland Pozolânico	115
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
ANEXOS	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Pantheon Romano	24
Figura 2.2 - Partícula esférica de cinzas volantes	35
Figura 2.3 - Partículas cenosféricas de cinzas volantes.....	35
Figura 3.1 – Hidróxido de cálcio X cura.....	47
Figura 3.2 – Expansão (%) X cura	49
Figura 3.3 – Calor de hidratação X % de material pozzolânico	51
Figura 3.4 – Resistência à compressão até 28 dias	51
Figura 3.5 – Resistência à compressão até 1 ano	52
Figura 3.6 – Retração por secagem X tempo	53
Figura 4.1 – Diagrama das estruturas da caulinita e serpentine.....	62
Figura 4.2 – Diagrama das estruturas da montmorilonita e saponita.....	63
Figura 4.3 – Diagramas das estruturas da muscovita e illita e vermiculita.....	63
Figura 4.4 – Diagramas das estruturas da haloisita hidratada e não-hidratada	64
Figura 4.5 – Caulinita de origem inglesa - 17 µm.....	65
Figura 4.6 - Haloisita de origem americana - 2 µm.	65
Figura 4.7 - Illita de origem americana – 7,5 µm.	66
Figura 5.1 – Bloco estrutural	69
Figura 5.2 – Vista superior do forno	74
Figura 5.3 – Vista superior de uma janela de alimentação	74
Figura 5.4 – Esquema de forno Hoffman – vista superior	76
Figura 5.5 – Esquema de forno Hoffman – corte AA.....	76
Figura 5.6 – Esquema de funcionamento de forno contínuo	76
Figura 5.7– Bloco cerâmico triturado manualmente	77
Figura 5.8 – Moinho utilizado na 1ª tentativa	78
Figura 5.9 – Amostra após a 1ª tentativa de moagem.....	79

Figura 5.10 – Britador de mandíbulas.....	80
Figura 5.11 – Amostra britada	81
Figura 5.12 - Granulometria de entrada no moinho (bloco de vedação)	82
Figura 5.13 - Granulometria de entrada no moinho (bloco estrutural)	83
Figura 5.14 – Amostra de vedação após a moagem.....	85
Figura 5.15 – Amostra estrutural após a moagem.....	85
Figura 5.16 – Granulometria a laser - (lente = 20 mm – bloco de vedação) ...	92
Figura 5.17 –Granulometria a laser - (lente = 50 mm – bloco de vedação)	92
Figura 5.18 - Granulometria a laser - (lente = 20 mm – bloco de vedação)	93
Figura 5.19 - Granulometria a laser - (lente = 20 mm – bloco de vedação)	93
Figura 5.20 – Espectro de difração (bloco de vedação).....	99
Figura 5.21 – Espectro de difração (bloco estrutural).....	99
Figura 5.22 – Metalizador.....	101
Figura 5.23 – Porta amostra do metalizador	101
Figura 5.24 – MEV e EDS	102
Figura 5.25 – Amostra de bloco de vedação (75 X)	103
Figura 5.26 – Amostra de bloco de vedação (1500 X)	104
Figura 5.27 – Amostra de bloco de vedação (1500 X)	104
Figura 5.28 – Bloco de vedação (5000 X)	106
Figura 5.29 – Bloco de vedação (7500 X)	107
Figura 5.30 – Bloco estrutural (75 X)	108
Figura 5.31 – Bloco estrutural (1000 X)	108
Figura 5.32 – Bloco estrutural (1000 X)	109
Figura 5.33 – Bloco estrutural (5000 X)	111
Figura 5.34 – Bloco estrutural (7500 X)	112
Figura 5.35 – Amostra de bloco de vedação.....	116
Figura 5.36 - Amostra de bloco estrutural.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Exigências químicas.....	26
Tabela 2.2 - Exigências físicas	26
Tabela 2.3 - Exemplos de pozolanas	28
Tabela 2.4 - Composição química de pozolanas naturais	29
Tabela 2.5 - Composição mineralógica de pozolanas naturais	30
Tabela 2.6 - Composição química das cinzas volantes	36
Tabela 2.7 - Composição química da escória de alto-forno moída	39
Tabela 3.1 – Abreviação dos compostos do clínquer	42
Tabela 3.2 - Penetração de água em pastas de cimento Portland e pozolana	47
Tabela 3.3 - Expansão de corpos-de-prova imersos em sulfatos (solução 10% Na_2SO_4).....	53
Tabela 3.4 - Perda de resistência à compressão (solução 4% Na_2SO_4).....	54
Tabela 3.5 - Propriedades físico-químicas	55
Tabela 3.6 - Atividade pozolânica com CP II F 32 após 28 dias de cura.....	55
Tabela 3.7 - Hidróxido de cálcio presente na pasta após 28 dias de cura	56
Tabela 3.8 - Resistência à compressão simples (MPa)	56
Tabela 4.1 - Cerâmica vermelha no Brasil (ano 2003)	58
Tabela 4.2 – Cerâmica no Brasil.....	58
Tabela 5.1 - Composição química de uma lama de alto-forno	71
Tabela 5.2 - Resultado do peneiramento da 1ª tentativa de moagem.....	79
Tabela 5.3 - Granulometria após britagem (bloco de vedação).....	81
Tabela 5.4 - Granulometria após britagem (bloco estrutural).....	82
Tabela 5.5 - Percentual retido acumulado após 2ª tentativa de moagem.....	84
Tabela 5.6 - Fatores de correção.....	88
Tabela 5.7 - Granulometria por elutriação (vedação)	89
Tabela 5.8 - Granulometria por elutriação (estrutural).....	89

Tabela 5.9 - Granulometria a laser	91
Tabela 5.10 – Análise química geral (bloco de vedação)	105
Tabela 5.11 – Análise química pontual (bloco de vedação).....	105
Tabela 5.12 – Análise química geral (bloco estrutural)	109
Tabela 5.13 – Análise química pontual (bloco estrutural).....	110
Tabela 5.14 – Cimento Portland CP V – ARI.....	113
Tabela 5.15 – Índice de consistência	114
Tabela 5.16 – Índice de pozolanicidade.....	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC	Associação Brasileira de Cerâmica
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ARI	Alta Resistência Inicial
ASE	Área Superficial Específica
BET	Brunauer, Emmett e Teller
C ₂ S	Silicato Dicálcico
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₄ AF	Ferroaluminato Tetracálcico
CAD	concreto de alto desempenho
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CH	Cristais de Hidróxido de Cálcio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicatos de cálcio hidratado
CST	Companhia Siderúrgica de Tubarão
DRX	Difração de raios-X
EDS	Energy-Dispersive Spectrometer
FRX	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
MC	Metacaulim

MCAR	Metacaulim de Alta Reatividade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira Registrada
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PNUMA	Programa das Nações Unidas Para o Meio Ambiente
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
TM	Tijolo Moído
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UMA	Universidade Livre da Mata Atlântica
UN	United Nations (Organização das Nações Unidas)

LISTA DE UNIDADES

#	mesh (malha de peneira)
μm	micrometro
Å	Ångström
kgf/cm^2	quilograma força por centímetro quadrado
Mega	1×10^6
Micro	1×10^{-6}
Mili	1×10^{-3}
Nano	1×10^{-9}
mmHg	milímetros de coluna de mercúrio
MPa	mega Pascal
nm	nanometro
Ø	diâmetro
°C	graus Celsius
RPM	rotações por minuto
Tor	Torricelli (mesmo que mmHg)

RESUMO

O emprego de blocos de cerâmica vermelha finamente moídos como adição pozolânica aos cimentos, argamassas e concretos mostra-se uma alternativa viável, com vantagens de cunho técnico, econômico e ambiental, unindo um material desperdiçado pela indústria, e que nem sempre possui destinação adequada, a insumos e produtos largamente empregados na construção civil. Este trabalho apresenta o beneficiamento e caracterização destes resíduos, objetivando sua aplicação como adição pozolânica às argamassas, cimentos e concretos. Para tanto, foram utilizadas duas amostras diferentes: blocos cerâmicos de vedação e estruturais. As amostras foram moídas durante 150 minutos, obtendo valores abaixo de 19% retidos na peneira #325 (45 μm). A densidade obtida através de picnometria foi de 2,81 e 2,82 g/cm^3 , respectivamente. A área superficial específica das amostras foi de 8,46 e 4,26 m^2/g , respectivamente, sendo superiores aos valores médios obtidos no cimento Portland. O ensaio de difração de raios-x apresentou picos cristalinos identificados como quartzo e hematita, e parcialmente identificados, como rutilo e microclina, corroborando com os elementos obtidos na espectrometria de fluorescência de raios-X. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise (EDS) mostraram amostras com morfologia irregular, com predominância dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , cuja soma foi superior a 92%. Os ensaios de atividade pozolânica com cimento Portland foram satisfatórios quando comparados à NBR 5752, obtendo índices de atividade pozolânica superiores à 78%, com água requerida abaixo de 101%,. O ensaio de atividade pozolânica com cimento Portland pozolânico classificou as amostras como sendo material pozolânico. Os resultados obtidos mostraram-se promissores quanto à utilização dos resíduos como adições pozolânicas, apresentando índices físico-químicos e de atividade pozolânica dentro dos valores permitidos pelas normas brasileiras.

Palavras-chave: resíduo cerâmico, chamote, reciclagem, blocos cerâmicos, adições pozolânicas, índice de atividade pozolânica.

ABSTRACT

The use of red ceramics bricks finely grinded as pozzolanic addition to cements, mortar and concrete reveals a viable alternative, with technical, economic and environmental advantages, joining wasted material by the industry, which not always has a proper destination, to the input and products wide used in the civil construction. This work presents the improvement and characterization of these residues, objectifying its application as pozzolanic addition to mortars, cements and concretes. Therefore, two different samples had been used: structural and seal ceramic bricks. The samples were grinded during 150 minutes, getting values below of 19% in the sieve #325 (45 μm). The density gotten through of pycnometer was of 2,82 and 2,81 and g/cm^3 , respectively. The surface area of the samples was 4,26 and 8,46 m^2/g , respectively, being superior to the average values gotten in the Portland cement. The X-rays diffraction analysis presented crystalline peaks identified as quartz and hematites, and partially identified, as rutilo and microcline, corroborating with the elements gotten in the X-rays fluorescence spectrometry. The scanning electron microscopy and microanalysis had shown samples with irregular morphology, with predominance of the oxides SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 , whose addition was superior 92%. The pozzolanic activity tests with Portland cement were satisfactory if compared to NBR 5752 values, getting superior indexes of pozzolanic activity to 78%, with required water below 101%. The pozzolanic activity tests with pozzolanic Portland cement classified the samples as being pozzolanic materials. The obtained results revealed to be promising for the use of the studied wastes, presenting physiochemical indexes and pozzolanic activity within range allowed by the Brazilian norms.

Keywords: ceramic waste, recycling, ceramic bricks, pozzolanic addition, pozzolanic activity test.

1. INTRODUÇÃO

Através de sua existência, o ser humano tem ocupado e transformado a superfície terrestre de acordo com suas conveniências. Suas necessidades de moradia, alimentação, higiene e outras, fizeram com que o homem habitasse todas as regiões do planeta, com exceção ao continente antártico. O represamento e mudança de curso de aquíferos para captação de água potável, o desmatamento de florestas para plantio e criação de animais, modificação da topografia através de escavações e aterros e a extração de minérios são exemplos das modificações impostas ao meio ambiente.

Essas alterações tornaram-se maiores, mais rápidas e significativas com o advento da Revolução Industrial. Iniciada na Inglaterra, em meados do século XVIII, estendeu-se a outros países da Europa, Japão e Estados Unidos durante o século XIX e caracterizou-se pela substituição da energia física pela energia mecânica, da ferramenta pela máquina e da manufatura pela fábrica no processo produtivo.

A Revolução Industrial acelerou o crescimento das cidades. As populações abandonavam o campo e migravam para os centros urbanos à procura de oportunidades. Estabelecia-se, então, uma nova ordem social, onde a escravidão e os produtos agrícolas davam lugar ao trabalho assalariado e os produtos industrializados.

O impacto das atividades industriais, dos grandes aglomerados urbanos e da expansão da agricultura sobre a biosfera aumentou. O crescimento da população urbana trouxe problemas. Não havia a infra-estrutura para receber a massa de trabalhadores que chegava.

Como consequência deste panorama, houve a expansão desmedida na geração dos resíduos, tanto industrial como urbano. Contudo, ainda não havia nenhum tipo de gerenciamento sobre os resíduos e não existiam redes de abastecimento de água e de esgoto sanitário.

Os vetores se proliferavam nestas condições, espalhando doenças e levando milhares de pessoas à morte.

Na Segunda Revolução Industrial, a partir de 1860, novas transformações técnicas como o motor de combustão interna e o dínamo, alavancaram ainda mais a produção. A introdução da linha de montagem em série, nos Estados Unidos, na década de 1920, revolucionou o parque industrial da época, aumentando a produtividade e, conseqüentemente, barateando os produtos para o consumidor. As mercadorias atingiram padronização e quantidades impensáveis, gerando, posteriormente, o fenômeno da superprodução. Começava aí o estímulo ao consumo.

Somente a partir da década de 1960, este quadro começou a mudar. Alguns autores passaram a se preocupar com o impacto causado pelas atividades antrópicas sobre o meio ambiente. Fatos importantes como a reunião do Clube de Roma (final dos anos 60), a Conferência de Estocolmo sobre Meio Ambiente (em 1972) e o relatório “Nosso Futuro Comum”, elaborado por uma comissão da ONU em 1987, aumentaram a fomentação sobre o ASSUNTO. A chamada “Carta de Roterdã” (elaborada em 1991 pela Câmara Internacional do Comércio - International Chamber of Commerce) proporcionou mudanças no posicionamento das empresas em relação à questão ambiental. Este documento trata dos “Princípios do Desenvolvimento Sustentável” - 16 princípios que estabelecem a gestão ambiental como uma das mais altas prioridades das empresas (CLUB OF ROME, 2007; MEADOWS, 1972 e ALBERTON, 2003).

Um dos maiores marcos das mudanças ocorridas foi a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, conhecida como ECO-92 (UNITED NATIONS, 2006 e MMA, 2006). Realizada no ano de 1992, na cidade do Rio de Janeiro, contou com a presença de vários líderes mundiais, que discutiram meios para um desenvolvimento industrial amparado em questões ambientais. A partir daí foi gerado um documento, conhecido como Agenda 21,

onde estão apresentadas as conclusões deste encontro. Destacam-se as seguintes providências:

- Redução de resíduos;
- Reutilização de subprodutos;
- Reciclagem de resíduos;
- Promoção de sistemas adequados de tratamento e disposição de resíduos e ampliação da cobertura dos serviços de limpeza urbana.

Os Estados também mudaram, na tentativa de conter os avanços da degradação ambiental. A partir da década de 1980, a maioria dos países criou leis ambientais mais restritivas. Surgiram órgãos específicos para tratar das questões ambientais. Junte a isto o aumento da conscientização da população, principalmente dos países desenvolvidos e a maior veiculação de temas relativos a estas questões em grandes meios de comunicação.

Nas últimas décadas, a sociedade tem experimentado um interesse maior e crescente quanto a utilização de novos materiais em substituição à produtos consagrados, numa tentativa de diminuir o impacto ambiental causado por eles. Uma das formas encontradas é o aproveitamento de resíduos como substituição total ou parcial de outros produtos. Dentro deste tema, os diversos setores que compõem a construção civil, principalmente as indústrias cimenteiras, têm especial importância, uma vez que são um dos maiores consumidores de recursos naturais.

A utilização de adições minerais representa a economia de recursos naturais na produção de cimentos e concretos, uma vez que são subprodutos industriais. Além de resíduos já consagrados, como

escória de alto forno e a sílica ativa, existe uma gama maior de resíduos e/ou subprodutos com potencial para a substituição ou incorporação aos cimentos e concretos, como os próprios resíduos de construção e demolição (RCD) e cerâmicos, como telhas, tijolos e blocos.

1.1. IMPORTÂNCIA DO TEMA

Os problemas ambientais têm despertado no ser humano, principalmente aquele que vive nas grandes cidades, um pensamento mais profundo sobre a minimização de resíduos por intermédio da reciclagem e reutilização de produtos que simplesmente seriam considerados inservíveis. A sociedade, preocupada com o futuro do planeta, está mais consciente e exigente com o destino final reservado aos seus resíduos.

É neste contexto que o reuso, a reciclagem de resíduos e a redução do consumo (“3 R’s”) ganham destaque.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da resolução n.º 264 (BRASIL, 1999), define procedimentos, critérios e aspectos técnicos para o licenciamento ambiental para o co-processamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer, para a fabricação de cimento. Esta resolução define o co-processamento como sendo a “técnica de utilização de resíduos sólidos industriais a partir do processamento desses como substituto parcial de matéria-prima e/ou de combustível no sistema forno de produção de clínquer, na fabricação de cimento”. Outrossim, entre os critérios básicos para a utilização de resíduos ditados por essa resolução, encontra-se a alternativa da utilização do resíduo como substituto à matéria-prima, desde que apresente características similares às dos componentes normalmente empregados na produção de clínquer, incluindo-se os materiais mineralizadores e/ou fundentes.

A construção civil é responsável por entre 15 e 50% do consumo dos recursos naturais extraídos e é responsável por cerca de 15% do PIB brasileiro (JOHN, 2007). Segundo METHA e MONTEIRO (1994), o consumo mundial de concreto é estimado em 5,5 bilhões de toneladas por ano, enquanto o de cimento atingiu 2,139 bilhões de toneladas em 2004 (CIMENTO.ORG, 2007).

Um grande número de pesquisadores tem abordado o tema do aproveitamento e reciclagem de materiais oriundos de resíduos de construção e demolição, deixando de fora os resíduos gerados na produção de insumos para a construção civil.

A indústria cerâmica tem um índice de perdas na cadeia produtiva entre 5 e 10% da produção (SABOYA JÚNIOR et al, 2000 apud CORDEIRO, VAILLANT & DÉsir, 2001). Se considerarmos que a produção brasileira gira em torno de 64 milhões de toneladas/ano (ABC, 2007), o volume de resíduo poderia chegar a 6,4 milhões de toneladas/ano, o que por si só justifica o interesse e o estudo de temas relacionados ao aproveitamento destes resíduos.

Entretanto, além do volume gerado, os subprodutos cerâmicos apresentam potencial para utilização como adições minerais ao cimento Portland e concretos, cabendo aos pesquisadores delinear suas qualidades e propriedades, além dos aspectos técnicos, econômicos e sociais. Somente com estudos sobre os processos envolvidos será possível determinar a aplicabilidade dos novos materiais, e conseqüentemente, diminuir o volume de resíduos gerados.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a caracterização dos resíduos de cerâmica vermelha gerados durante o processo produtivo de blocos cerâmicos estruturais e de vedação, com vistas ao beneficiamento e

aplicação como adição pozolânica em argamassas, cimentos e concretos.

Dentre os objetivos específicos deste trabalho, podemos citar:

- Estudo do método de beneficiamento do resíduo bruto por meio da cominuição (trituração e moagem), visando sua aplicação como adição ao cimento Portland;
- Caracterização físico-química e microestrutural dos resíduos após o beneficiamento;
- Avaliação de suas propriedades pozolânicas.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos materiais pozolânicos, sua história, definições e classificações. Apresenta também os principais materiais pozolânicos naturais e artificiais, utilizados dos como adições minerais ao cimento Portland.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre as características e efeitos das adições pozolânicas sobre as propriedades do cimento Portland e concretos, além de considerações sobre as reações pozolânicas e adições à base de resíduos cerâmicos.

O capítulo 4 apresenta a cerâmica vermelha e suas aplicações, fornecendo um panorama sobre a indústria cerâmica brasileira, principais matérias-primas e suas composições.

O capítulo 5 apresenta os procedimentos experimentais da pesquisa, desde a visita à olaria, coleta dos resíduos, beneficiamento, caracterização, ensaios e resultados.

O capítulo 6 apresenta as considerações finais sobre a pesquisa, abordando os resultados obtidos, comparando-os com os modelos existentes. Outrossim, este capítulo apresenta as dificuldades encontradas na pesquisa e procedimentos experimentais.

O capítulo 7 apresenta as sugestões e temas para a continuidade da pesquisa.

2. MATERIAIS POZOLÂNICOS

O nome pozolana remete à Roma antiga. Os romanos utilizavam rochas vulcânicas contendo zeólita, que é uma denominação genérica de silicatos hidratados de alumínio e/ou cálcio. A zeólita era encontrada aos pés do Monte *Vesuvius*, em *Pozzuoli*. Devido ao nome da cidade, o material ficou conhecido como pozolana (MEHTA, 1987).

Antes do advento dos cimentos à base de silicatos de cálcio (cimento Portland) no século XIX, traços de pozolana e cal foram os precursores dos materiais cimentícios na construção de estruturas hidráulicas e alvenaria através do mundo.

As pozolanas foram utilizadas pelos Romanos em diversos tipos de construções (aquedutos, cisternas, diques, etc.), e sua resistência e durabilidade são comprovadas pelas estruturas que sobreviveram aos milênios, como por exemplo, o Pantheon Romano (figura 2.1).



Figura 2.1 – Pantheon Romano

Fonte: WIKIPÉDIA, 2006.

Embora, o nome tenha sido celebrizado pelos romanos, há indícios da utilização de argamassas contendo argila calcinada em estruturas edificadas pela cultura minoana, entre 1500 e 2000 a.C., na ilha de Creta (LEA, 1971). Os gregos também faziam uso de materiais pozolânicos, utilizando cinzas vulcânicas oriundas da ilha de Santorini.

Com a invenção do cimento Portland, o uso de pozolanas naturais decresceu gradualmente. Este declínio deveu-se às características comparativas entre os materiais, com vantagens para o primeiro, que possui tempo de pega mais rápido e maior resistência mecânica.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992d), materiais pozolânicos são:

“Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes”.

Para que o material seja considerado com pozolânico, algumas condições gerais (classificação; embalagem e marcação; transporte e armazenamento) e específicas (químicas e físicas) devem ser satisfeitas.

A classificação obedece às seguintes determinações:

- **Classe N:** Pozolanas naturais e artificiais que obedeçam aos requisitos da NBR 12653 (Ex.: terras diatomáceas e argilas calcinadas);
- **Classe C:** Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas que obedeçam aos requisitos da NBR 12653;
- **Classe E:** Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido na NBR 12653.

As tabelas 2.1 e 2.2 apresentam as exigências químicas e físicas requeridas.

Tabela 2.1 - Exigências químicas

PROPRIEDADES	CLASSE DE MATERIAL POZOLÂNICO		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (% mín.)	70	70	50
SO_3 (% máx.)	4,0	5,0	5,0
Teor de Umidade (% máx.)	3,0	3,0	3,0
Perda ao Fogo (% máx.)	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na_2O	1,5	1,5	1,5

Fonte: ABNT, 1992d.

Tabela 2.2 - Exigências físicas

PROPRIEDADES	CLASSE DE MATERIAL POZOLÂNICO		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 μm (% máx.)	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (% mín.)	75	75	75
Com cal aos 7 dias, em MPa	6,0	6,0	6,0
Água requerida (% máx.)	115	110	110

Fonte: ABNT, 1992d.

LEA (1971) cita que não deve haver limitações restritivas quanto à composição química dos materiais pozolânicos, uma vez que não há uma correlação exata entre composição química, finura e o estado vítreo destes materiais. MEHTA e MALHORTA (1987) acrescentam que a relação entre o estado vítreo e a atividade pozolânica é complexa e que as normas deveriam considerar características físicas e mineralógicas, além da composição química dos materiais pozolânicos.

Usualmente, os materiais pozolânicos são divididos em dois grandes grupos:

a) **Pozolanas Naturais:** normalmente de origem vulcânica, também podem ser oriundas de rochas sedimentares ou fósseis. Possuem grande teor de sílica (dióxido de silício - $\text{SiO}_2 \geq 65\%$);

b) **Pozolanas Artificiais:** oriundas de processos industriais (Ex.: escórias, cinzas volantes, etc.) ou tratamento térmico de alguns tipos de argilas.

Entretanto, existem divergências entre quanto esta classificação, principalmente quanto à natureza de argilas calcinadas. Alguns autores, como MONTANHEIRO et al (2002a) e ABNT (1992d), classificam como pozolanas naturais todas as rochas portadoras de atividade pozolânica natural. Por outro lado, MEHTA (1987) também considera como pozolanas naturais os produtos da calcinação dessas rochas.

FAICK (1963, apud SANTOS, 1992) considera que o termo “pozolana artificial” deveria ser reservado apenas aos subprodutos industriais, incluindo a utilização de tijolos e/ou telhas moídos.

A controvérsia também atinge a qualificação das pozolanas artificiais. DAL MOLIN (2005) classifica a escória granulada de alto-forno como material cimentante, que não necessita do hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 - presente no cimento Portland para formar silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), não lhe atribuindo a denominação de pozolana. Já MONTANHEIRO et al (2002a) classifica-a como sendo uma pozolana artificial.

A tabela 2.3 apresenta exemplos de pozolanas naturais e artificiais.

Tabela 2.3 - Exemplos de pozolanas

POZOLANAS NATURAIS	POZOLANAS ARTIFICIAIS
Rochas Vulcânicas Ácidas	Escórias Ácidas de Alto-forno
Tufos Vulcânicos	Cinzas Volantes
Terras Diatomáceas	Resíduos Argilosos de Folhelhos Betuminosos Após Extração
Arenitos e Folhelhos Opalinos	Microsílica
Argilitos de Argilas Mal Cristalizadas	Argilas Calcinadas (Metacaulinita)

Fonte: MONTANHEIRO et al, 2002a.

2.1. POZOLANAS NATURAIS

Além das controvérsias citadas anteriormente, a classificação de pozolanas naturais é dificultada pela variedade de suas composições e propriedades.

Fatores como forma, tamanho e distribuição do tamanho das partículas, densidade, composição química e mineralógica podem influenciar a atividade pozolânica, representando um empecilho à classificação destes materiais.

Baseado no constituinte químico capaz de reagir com o Ca(OH)_2 presente nos produtos hidratados do cimento, MEHTA (1987) propõe a classificação das pozolanas naturais em quatro categorias:

- a) Vidros Vulcânicos;
- b) Tufos Vulcânicos;
- c) Argilas ou Folhelhos Calcinados;
- d) Terra Diatomácea.

Para efeito didático, as argilas calcinadas serão abordadas no item sobre pozolanas artificiais (2.2.1), uma vez que o metacaulim (espécie de argila calcinada) já é utilizado em escala industrial na adição ao cimento Portland e na produção de concretos de alto desempenho (CAD).

As tabelas 2.4 e 2.5 apresentam, respectivamente, a composição química e análise mineralógica típicas de algumas pozolanas naturais.

Tabela 2.4 - Composição química de pozolanas naturais

POZOLÂNA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ÁLCALIS	PERDA AO FOGO	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA (*)
Terra de Santorini	65,1	14,5	5,5	3,0	1,1	6,5	3,5	1
Tufo Vulcânico de Rheinisch	53,0	16,0	6,0	7,0	3,0	6,0	---	2
Fenólito	55,7	20,2	2,8	4,2	1,1	10,8	3,6	3
Tufo Romano	44,7	18,9	10,1	10,3	4,4	6,7	4,4	4
Vidro Napolitano	54,5	18,3	4,6	7,4	1,0	11,0	3,1	4
Sílica Opalina	65,4	10,1	4,2	4,6	2,7	1,4	6,3	5
Diatomita	86,0	2,3	1,8	---	0,6	0,4	5,2	5
Púmice	65,7	15,9	2,5	3,4	1,3	6,9	3,4	5
Púmice de Jalisco	68,7	14,8	2,3	---	0,5	9,3	5,6	6

Fonte: ¹MEHTA (1981), ²LOCHER (1985), ³KASSAUTZKI (1983), ⁴MASSAZA & COSTA (1979), ⁵MIELLENZ, WHITTE & GLANTZ (1950), ⁶POO et al (1985) apud METHA, 1987.

Tabela 2.5 - Composição mineralógica de pozolanas naturais

POZOLÂNA	MATÉRIA NÃO-CRISTALINA ESTIMADA (%)	PRINCIPAIS MINERAIS CRISTALINOS	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA (*)
Terra de Santorini	65 - 75	Quartzo, anortita, labradorita	1, 7
Tufo Vulcânico de Rheinisch	50 – 60	Quartzo, feldspato, <i>analcine</i>	8
Fenólito	Não reportado	Ortoclásio, albite, piroxênio, calcita	3
Tufo Romano	Não reportado	Chabazite, filipsita, <i>herschelilite</i>	9
Vidro Napolitano	50 – 70	Quartzo, feldspato	10
Púmice de Jalisco	90	Sanidina	6

Fonte: ¹MEHTA (1981), ⁷NICOLAIDIS (1957), ⁸SCHWIETE, LUDWIG & WIGGER (1961), ³KASSAUTZKI (1983), ⁹LEA (1971), ¹⁰MASSAZA (1977), ⁶POO et al (1985) apud METHA, 1987.

2.1.1. Vidros Vulcânicos

Os vidros vulcânicos são rochas extrusivas provenientes do resfriamento rápido do magma. São ricos em compostos reativos, principalmente os silicatos de alumínio. As cinzas vulcânicas da ilha de Santorini, na Grécia, são exemplos deste tipo de pozolana.

De natureza vítrea (não cristalino), possui textura microporosa, que propicia uma grande superfície específica, responsável pela reatividade química do material. A área superficial específica obtida pelo método de BET (adsorção de nitrogênio), apresenta uma faixa de valores entre 3800 e 15.500 m²/kg. (MEHTA, 1987 e MINEROPAR, 2006).

2.1.2. Tufos Vulcânicos

São rochas vulcânicas de granulação média à fina, formadas pela ação hidrotérmica sobre depósitos de materiais magmáticos (cinzas vulcânicas) e/ou pulverização de rochas pré-existentes. Seus componentes possuem diâmetro inferior a 2 mm. A maioria possui de 0,062 a 2 mm (LEINZ & MENDES, 1959, PERONI, 2007 e MINEROPAR, 2006).

Quanto à composição dos fragmentos, podem ser de três tipos (SUGUIO, 1998 e GUERRA, 1969):

- a) Tufo vulcânico cristalino: O tufo vulcânico cristalino possui em sua composição mais de 75% de cristais vulcânicos e fragmentos de cristais ejetados;
- b) Tufo vulcânico lítico: No tufo vulcânico lítico predominam fragmentos de rochas cristalinas geradas do resfriamento rápido dos materiais vulcânicos;
- c) Tufo vulcânico vítreo: Mais de 75% da composição do tufo vulcânico vítreo é constituída por cinza vulcânica endurecida.

2.1.3. Sílicas Opalinas e Terras Diatomáceas

As sílicas opalinas são formadas pela deposição de sílica gel hidratada, resultante da deposição de óxidos solúveis lixiviados.

As sílicas opalinas são muito reativas à cal, pois sua alta área superficial requer um consumo elevado de água. Esta característica microestrutural é prejudicial à resistência e durabilidade do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Geralmente, estes materiais possuem uma grande quantidade de argilominerais, sendo necessária a calcinação dos mesmos para o uso como material pozolânico.

Um dos principais tipos de sílica opalina é a terra diatomácea. A terra diatomácea é um sedimento amorfo, de origem orgânica, formada a partir de compostos hidratados de sílica não-cristalina, originados a partir da parede celular de organismos unicelulares aquáticos, como algas microscópicas (SANTOS, 1992). As terras diatomáceas se destacam como sendo uma das principais substâncias naturais pozolânicas (MONTANHEIRO, 2002b).

2.2. POZOLANAS ARTIFICIAIS

2.2.1. Argilas Calcinadas e Metacaulim

Como dito anteriormente, existem divergências quanto à classificação das argilas calcinadas.

Ao contrário dos vidros e tufos vulcânicos, a argila só apresenta reatividade quando sofre processo térmico. Quando submetidas à temperaturas entre 600 e 1000 °C, a estrutura cristalina dos silicatos presentes na argila é alterada, transformando-a em compostos amorfos e desordenados, que reagem prontamente com a cal, à temperatura ambiente. Entretanto, nem todas as argilas calcinadas apresentam comportamento pozolânico. Argilas compostas por grande quantidade de minerais muito cristalinos, como quartzo e feldspato, não produzem um material reativo com cal (MEHTA, 1987).

MIELENZ (1983, apud MEHTA, 1987) descreve que argilas ricas em minerais caulinita e/ou montmorilonita necessitam ser calcinadas em temperaturas entre 540 a 980 °C para apresentarem resultados satisfatórios de atividade pozolânica. Entretanto, se a montmorilonita for rica em cátions de sódio livres, seu uso em concretos deve ser evitado, devido à possíveis reações álcali-agregado. Já as argilas ricas em vermiculita, clorita e mica não apresentaram atividade pozolânica satisfatória, se calcinadas abaixo de 1100 °C.

O metacaulim é uma adição mineral originada na calcinação do rejeito de argilas cauliníticas e caulins em temperaturas entre 600 e 900 °C. Nesta faixa de temperatura, a argila perde os íons hidroxila de sua estrutura cristalina, causando a destruição do arranjo atômico, criando um componente amorfo e de grande instabilidade química, chamado de metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), responsável pela atividade pozolânica, formando predominantemente C-S-H e C_4AH_x (DAL MOLIN, 2005).

A temperatura deve ser controlada para evitar a fusão do material, mas garantindo que o produto final seja reativo com o hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Segundo BARATA (1998), acima de 900 °C há a formação de compostos cristalinos estáveis com menor área superficial específica e pouca atividade pozolânica.

Segundo SOUZA & DAL MOLIN (2002), com a redução do tamanho das partículas a valores inferiores a 5 μm através da moagem, constata-se uma excelente atividade pozolânica, sendo denominado por alguns autores como metacaulim de alta reatividade (MCAR). Esta capacidade pozolânica faz com que este material possa substituir parte do cimento no concreto com o objetivo de aumentar a sua durabilidade e a sua resistência. O nome MCAR também é atribuído ao resíduo oriundo da indústria de cobertura de papel, que constitui um caulim beneficiado de extrema finura, brancura e pureza. Outrossim, o termo também é empregado para distinguir o produto da calcinação de argilas extremamente finas, com alto teor de caulinita e material amorfo, de outras, proveniente da calcinação de argilas ricas em fases pozolanicamente inertes.

De acordo com RAMACHANDRAN et al (2002), a área superficial específica da metacaulinita é da ordem de 20 m^2/g

2.2.2. Cinzas Volantes

São resíduos obtidos por meio da precipitação eletrostática ou captação mecânica das poeiras que acompanham os gases de combustão dos queimadores de centrais termoelétrica alimentadas por carvão pulverizado ou granulado (CAMÕES, 2002).

As partículas de carvão pulverizando permanecem na chama oxidante (1200 a 1600 °C) durante cerca de dois segundos, promovendo a fusão total ou parcial do material (SILVA, 1999). Formam-se, assim, dois tipos de cinzas: pesadas e volantes.

As cinzas pesadas possuem granulometria mais grosseira que as cinzas volantes, caindo em tanques de resfriamento e removidas.

Devido à finura das partículas, as cinzas volantes são arrastadas pelos gases oriundos da combustão do carvão. Para coletá-las, utilizam-se precipitadores eletrostáticos ou métodos mecânicos, que capturam as partículas antes da emissão na atmosfera. Representam de 80 a 85% das cinzas produzidas.

É uma das pozolanas artificiais mais comuns. Geralmente, as partículas possuem formato esférico ou cenosférico, muito fina, com diâmetros entre 1 e 150 μm , sendo que a maior parte encontra-se abaixo de 45 μm . A faixa granulométrica é altamente influenciada pelo tipo de equipamento (mecânico ou eletrostático) utilizado para coleta das cinzas. Suas propriedades químicas variam com a composição do carvão e impurezas contidas no processo. De um modo geral, 85% da composição química das cinzas é formada compostos químicos e cristais de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3) e cal (CaO) (BERRY & MALHORTA, 1987 e CAMÕES, 2002). As figuras 2.2 e 2.3 apresentam exemplos de partículas de cinzas volantes.

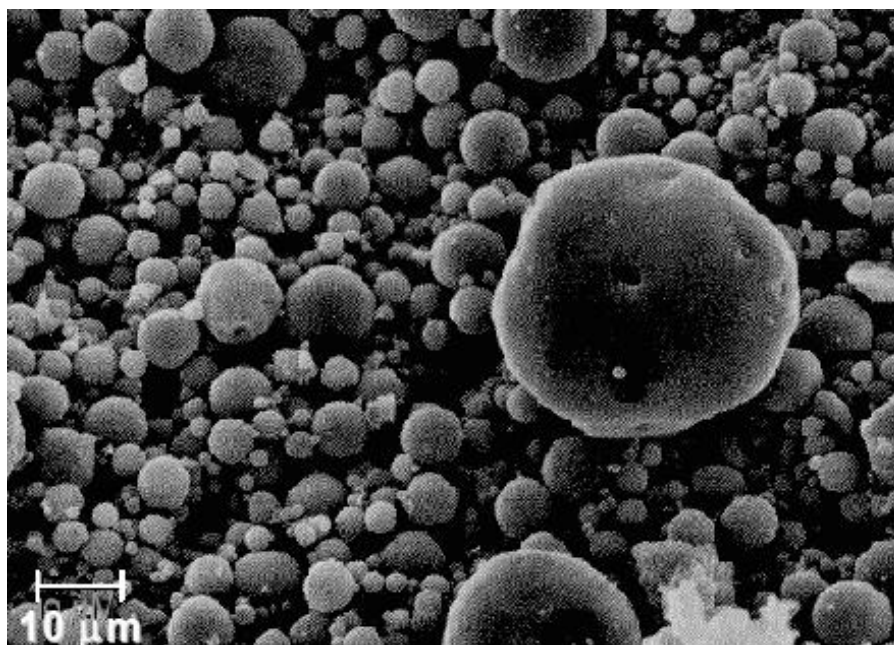


Figura 2.2 - Partícula esférica de cinzas volantes
Fonte: CAMÕES, 2002.

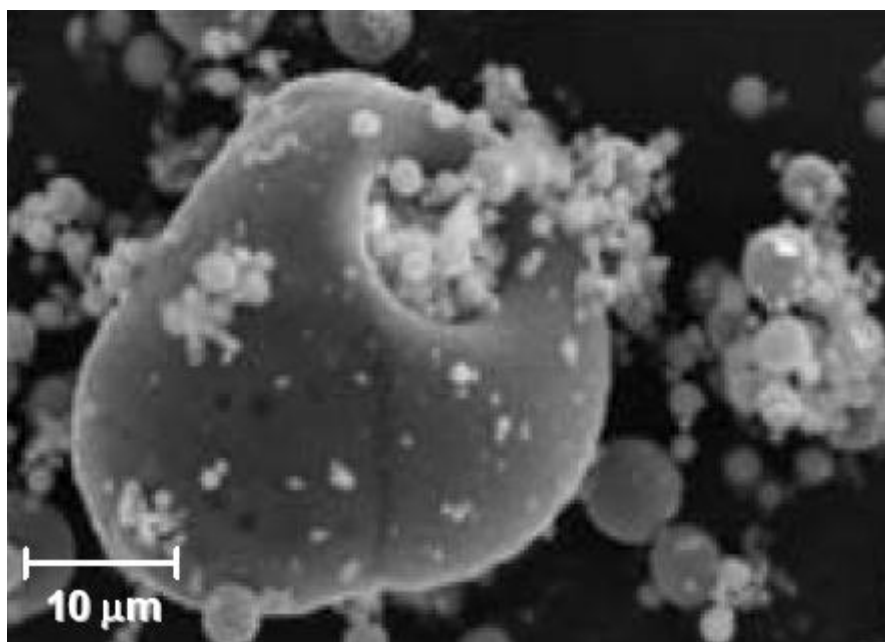


Figura 2.3 - Partículas cenosféricas de cinzas volantes
Fonte: CAMÕES, 2002.

A tabela 2.6 apresenta a composição química média das cinzas volantes.

Tabela 2.6 - Composição química das cinzas volantes

PAÍS	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PERDA AO FOGO
					Mínimo Máximo				
Alemanha	42	24	5,4	0,6	0,6	0,2	1,1	0,04	0,8
	55	33	13	8,3	4,3	1,3	5,6	1,9	5,8
Canadá	48	22	4,2	0,8	1,9	0,3	2,1	---	---
	56	33	11	9,7	44	1,8	5	---	---
Dinamarca	48	26	3,3	2,2	---	1,1	---	---	3,1
	65	36	8,3	7,8	---	2,8	---	---	4,9
Espanha	32	21	5,1	1,3	0,5	0,03	0,4	0,2	0,5
	64	35	26	20	2,7	0,7	4	4	10
EUA	40	17	8,5	1,2	0,8	0,4	1,8	0,3	1,2
	51	28	19	7	1,1	1,8	3	2,8	18
França	47	26	6,9	2,3	1,5	2,3	---	0,1	0,5
	51	34	8,8	3,3	2,2	6,4	---	0,60	4,5

Fonte: ALONSO & WESCH, 1991 apud CAMÕES, 2006.

2.2.3. Sílica Ativa

A sílica ativa, também conhecida comercialmente como microssílica, é um produto resultante do processo de fabricação de ferro-silício ou de silício metálico, e mais raramente, em ligas de ferro-cromo e ferro-manganês.

O processo é realizado em forno elétrico de fusão, tipo arco-voltaico, em temperaturas elevadas (mais de 2000 °C), promovendo a reação de quartzo de alta pureza com o carvão. Durante o processo de redução do quartzo, parte do silício é liberada na forma de gás (monóxido de silício gasoso - SiO), que é transportado à zonas de temperaturas mais baixas, onde entra em contato com o ar, oxidando-se na forma de dióxido de silício (SiO₂).

A sílica ativa é constituída por altos teores de SiO_2 (entre 85 a 98%), com partículas esféricas amorfas, com diâmetro entre 0,1 e 0,2 μm e superfície específica em torno de 20.000 m^2/kg (MEHTA, 1987 e MALHORTA, 1987).

Quando adicionada ao concreto, a sílica ativa promove reações pozolânicas, alterando a microestrutura do material. Ao contrário das pozolanas naturais, escórias e cinzas volantes, a reação do SiO_2 com o Ca(OH)_2 acontece de forma rápida e pouco variável, permitindo o desenvolvimento da resistência e da baixa permeabilidade em períodos curtos. Devido ao reduzido tamanho das partículas, a sílica ativa produz o efeito microfíler, preenchendo os espaços entre os grãos de cimento e a pasta, atuando como pontos de nucleação e melhorando a aderência pasta-agregado (DAL MOLIN, 2005).

Dentre as melhorias atribuídas à utilização da sílica ativa, podemos citar:

- Maior resistência mecânica;
- Proteção da armadura;
- Retenção de água;
- Mais pontos de nucleação;
- Redução do volume de vazios;
- Elevada resistência à abrasão;
- Maior resistência à altas temperaturas (concretos aluminosos);
- Menor permeabilidade.

2.2.4. Escória de Alto-Forno

Algumas escórias siderúrgicas podem apresentar propriedades pozolânicas, mas nem todas. Entre as mais estudadas e utilizadas, encontra-se a escória de alto-forno.

A escória de alto-forno é um resíduo siderúrgico industrial, proveniente da produção de ferro-gusa. O processo é realizado na unidade industrial chamada alto-forno, onde se reduzem os óxidos contidos nos minerais de ferro e se separam as impurezas que os acompanham.

As escórias se formam pela fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque. A escória fundida, por sua insolubilidade e menor densidade, sobrenada no ferro gusa.

As escórias de alto-forno podem ser resfriadas de duas formas (CST, 2006):

a) Resfriada ao ar ou cristalizada

São vazadas em estado líquido em pátios apropriados, onde são resfriadas ao ar. Por ser um processo lento, os seus componentes formam distintas fases cristalinas, e, com isto, não adquirem poder de aglomerante hidráulico. Essa escória recebe o nome de escória bruta de alto-forno, podendo ser britada ou utilizada como material inerte em diversas aplicações, substituindo materiais pétreos.

b) Resfriada com Água ou Granulada

A escória líquida é transportada para os granuladores, que são equipamentos onde ela é resfriada bruscamente por meio de jatos de água sob alta pressão. Não havendo tempo suficiente para formação

de cristais, essa escória se granula "vitrificando" e recebe o nome de escória granulada de alto-forno. Devido ao seu grande potencial hidráulico, a escória granulada de alto-forno tornou-se um material consagrado como adição ao cimento Portland.

A composição química das escórias de alto-forno varia de acordo com as matérias-primas empregadas e o tipo de ferro-gusa fabricado. A tabela 2.7 mostra a composição química aproximada de uma escória de alto-forno.

Tabela 2.7 - Composição química da escória de alto-forno moída
CARACTERÍSTICA QUÍMICA **RESULTADOS (%)**

SiO ₂	34,2
Al ₂ O ₃	11,9
CaO	42,0
Fe ₂ O ₃	0,4
FeO	0,2
MgO	3,2
K ₂ O	0,7
Na ₂ O	0,1
Mn ₂ O ₃	0,9
SO ₃	0,03
S	0,06

Fonte: VELTEN, 2006.

Segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 2007), a produção brasileira de ferro-gusa atingiu $26.733,9 \times 10^3$ toneladas em 2006. Em 2007, a produção acumulada entre janeiro e outubro já atingia $29.161,0 \times 10^3$ toneladas.

Nos fornos modernos, considerando-se minério de ferro de alta qualidade, a escória é produzida na razão de 280 a 340 kg por tonelada de ferro-gusa. Assim, a geração de escória de alto-forno no Brasil é da ordem de 9 milhões de toneladas.

A escória de alto-forno já é considerada como um material tradicional na adição ao cimento Portland. A ABNT, por intermédio das NBR's 5735 (ABNT, 1991c) e 11578 (ABNT, 1991e), institui a classificação "CP III" para cimento Portland de alto-forno e "CP II E" para cimento Portland composto com escória.

3. CARACTERÍSTICAS E EFEITOS DAS ADIÇÕES POZOLÂNICAS SOBRE AS PROPRIEDADES DO CIMENTO PORTLAND

3.1. CIMENTO PORTLAND

A palavra cimento deriva do latim *caementu*, que era usada na Roma antiga para designar uma espécie de pedra natural de rochedos e não possuía cortes e/ou ângulos retos (FERREIRA, 2004 e BATTAGIN, 2007).

O termo cimento Portland é a denominação convencional para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento, sendo assim reconhecido no mundo inteiro (ABCP, 2002).

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, obtido através do processo de moagem do clínquer, que é um material sinterizado, com diâmetro entre 5 e 25 mm, rico em silicatos de cálcio hidráulicos, geralmente adicionado com sulfatos de cálcio (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Antes da moagem, o clínquer sofre a adição de aproximadamente 5% de gipsita ou sulfato de cálcio, com o intuito de controlar as reações iniciais de pega e endurecimento do concreto. O produto então é moído em partículas pequenas, com diâmetros inferiores a 75 μm .

Os compostos do cimento Portland são expressos através dos óxidos dos elementos presentes, usando-se as abreviações apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Abreviação dos compostos do clínquer

ÓXIDO	ABREVIACÃO	COMPOSTOS	ABREVIACÃO
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
SiO_2	S	$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Al_2O_3	A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Fe_2O_3	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
MgO	M	$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$
SO_3	S	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
H_2O	H	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2

Fonte: MEHTA & MONTEIRO, 1994.

Entre os compostos constituintes do cimento Portland, quatro deles são considerados principais (NEVILLE, 1997), a saber:

- C_3S (Silicato Tricálcico)
- C_2S (Silicato Dicálcico)
- C_3A (Aluminato Tricálcico)
- C_4AF (Ferroaluminato Tetracálcico)

Para que o cimento Portland adquira as propriedades aglomerantes e endureça é preciso que uma série de reações de hidratação aconteça.

Estes compostos, ao hidratarem, cristalizam-se em 3 fases distintas: silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), cristais de hidróxido de cálcio (CH) e sulfoaluminatos de cálcio.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), os sulfoaluminatos de cálcio correspondem a cerca de 15 a 20% do volume da pasta endurecida, sendo a fase de menor destaque para o desenvolvimento das propriedades da pasta.

Já os silicatos de cálcio hidratados possuem uma composição química que varia de acordo com a relação água/cimento, temperatura e idade de hidratação. Por isso recebem a abreviação de

C-S-H, o que não implica numa composição fixa. Os C-S-H representam entre 50 e 60% do volume de sólidos da pasta hidratada de cimento Portland, sendo responsáveis pelas resistências mecânicas adquiridas após o endurecimento.

Diferentemente do C-S-H, os cristais de hidróxido de cálcio (CH) não concorrem substancialmente para a resistência mecânica da pasta endurecida. Dependendo da quantidade de CH, seu efeito pode ser deletério, tornando a pasta suscetível à ataques químicos.

O Ca(OH)_2 , presente na fase CH, é dissolvido pela água e arrastado através dos poros. Este processo de dissolução aumenta a porosidade da pasta endurecida e, com ela, sua permeabilidade. Isto implica na diminuição da resistência mecânica e tornando o concreto mais suscetível ao ataque de agentes deletérios.

3.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ATIVIDADE POZOLÂNICA

O índice de atividade pozolânica (IAP) é utilizado como parâmetro para avaliação de amostras de materiais destinados à utilização como adição pozolânica e/ou mineral.

De acordo com a NBR 12653 (1992d), o IAP é uma das exigências físicas para a classificação de um material como sendo pozolânico.

Além das definições, classificações e exigências físico-químicas estabelecidas para os materiais pozolânicos, a ABNT disciplina a metodologia aplicada à obtenção dos índices de atividade pozolânica (IAP) através das seguintes normas:

- NBR 5751: Materiais Pozolânicos – Determinação de Atividade Pozolânica - Índice de Atividade Pozolânica com Cal (ABNT, 1992a);

- NBR 5752: Materiais Pozolânicos - Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento Portland - Índice de Atividade Pozolânica com Cimento (ABNT, 1992b);
- NBR 5753: Cimento Portland Pozolânico - Determinação da Pozolanicidade (ABNT, 1992c).

As NBR's 5751 e 5752 determinam os índices de atividade pozolânica pelo comparativo de resistência entre corpos de prova originais de cal ou cimento Portland e amostras com substituição por material pozolânico. A NBR 5753 utiliza métodos químicos para determinação da atividade pozolânica. Estes ensaios serão descritos mais detalhadamente no capítulo 5.

Embora seja reconhecido o mérito das normas em criar metodologias para a comparação das atividades pozolânicas, considerando que os materiais com maior atividade pozolânica seriam melhores para o uso com o cimento Portland, alguns autores criticam as soluções adotadas por estas normas. RÊGO et al (2007) cita que a heterogeneidade entre os materiais pozolânicos explicaria a incapacidade de criar um modelo único para a avaliação dos índices de atividade pozolânica (IAP), e que estes ensaios apresentariam apenas tendências gerais sobre a atividade pozolânica do material ensaiado. ZAMPIERI (1994, apud RÊGO, 2007) cita que os métodos para a avaliação da atividade pozolânica são uma combinação de muitos fatores, que na maioria das vezes, não podem ser totalmente controlados. As características físicas e/ou mineralógicas do material, bem como a dosagem utilizada, aliados aos fatores externos como o cimento utilizado, a relação água/(aglomerante + adição), a temperatura e as condições de cura, são determinantes nos resultados destes testes. Assim, segundo esse autor, os requisitos básicos para uma metodologia de ensaio seriam:

- a) Ser hábil para distinguir entre materiais pozolânicos ou não;
- b) Fornecer informações sobre o grau de atividade pozolânica da mistura, além de dados sobre o desenvolvimento da resistência da mesma;
- c) Permitir a avaliação dos resultados num certo espaço de tempo, para que possam ser utilizados o quanto antes pela indústria da construção.

3.3. CIMENTO PORTLAND E CONCRETO COM ADIÇÕES POZOLÂNICAS

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), a economia de custos deve ter sido a razão principal para o desenvolvimento de cimentos Portland compostos com adições minerais, sejam elas pozolânicas, cimentantes ou de efeito fíler.

A utilização de adições minerais altera as propriedades reológicas, micro e macroestruturais dos cimentos, argamassas ou concretos, podendo prover benefícios ou não. A maior parte destas alterações está associada à granulometria fina das adições (efeito físico), à atividade pozolânica (efeito químico), ou a combinação de ambos. O beneficiamento causado pelas adições minerais é função direta da dosagem, condições de cura, características físico-químicas e mineralogia do material empregado (DAL MOLIN, 2005).

As adições pozolânicas devem possuir a capacidade de se combinar com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ produzido durante a hidratação da pasta de cimento Portland, evitando os efeitos negativos descritos anteriormente.

Os materiais pozolânicos possuem os mesmos óxidos utilizados no cimento Portland (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3), que irão reagir com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Esta interação recebe o nome de reação pozolânica.

MEHTA & MONTEIRO (1994) descrevem simplificadaamente a formação de C-S-H a partir de cimento Portland e cimento Portland pozolânico da seguinte forma:

- Cimento Portland (reação rápida):



- Cimento Portland pozolânico (reação lenta):



Das reações pozolânicas decorrem três aspectos positivos para a qualidade da pasta:

- I. A reação é mais lenta, se comparada ao cimento Portland comum. Assim, a liberação de calor e aumento da resistência também acontecem de forma mais lenta.
- II. A reação pozolânica consome Ca(OH)_2 presente, ao invés de liberá-lo. Esta interação é responsável pela formação de produtos com propriedades aglomerantes, do mesmo tipo dos formados na hidratação dos C-S-H, porém de natureza diferente, com relação CaO/SiO_2 mais baixa (menos alcalinos), mais resistente aos meios agressivos. A figura 3.1 mostra as mudanças na proporção do Ca(OH)_2 durante o período de cura, comparando uma amostra contendo apenas cimento Portland com outra, que possui 40% de material pozolânico.

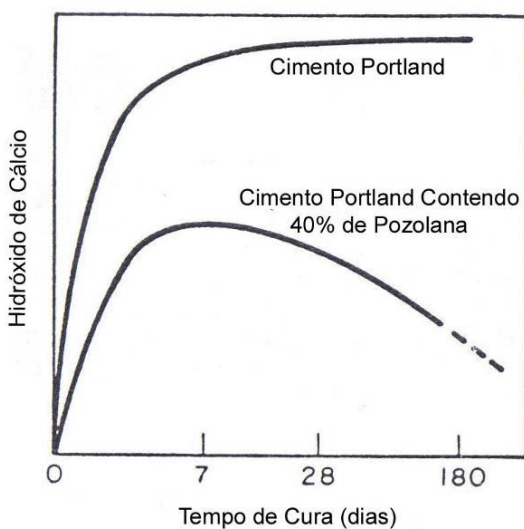


Figura 3.1 – Hidróxido de cálcio X cura
Fonte: LEA, 1971

III. Os produtos desta reação são eficientes no preenchimento de espaços capilares grandes, promovendo incremento da impermeabilidade, com conseqüentes melhorias da resistência mecânica e durabilidade. METHA (1987) estudou os efeitos da hidratação por meio de um teste de penetração de água em corpos-de-prova com percentuais de terra de Santorini em substituição ao cimento Portland, conforme apresentado na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Penetração de água em pastas de cimento Portland e pozolana

TEMPO DE HIDRATAÇÃO	PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO (mm)			
	Cimento Portland	Terra de Santorini		
		10%	20%	30%
28 dias	26	24	25	25
90 dias	25	23	23	22
1 ano	25	23	18	15

Fonte: MEHTA, 1981 apud MEHTA, 1987.

Observa-se a redução significativa na permeabilidade das amostras contendo 20 e 30% de material pozolânico após um ano. Esta redução é decorrente da reação pozolânica, que transforma o Ca(OH)_2 em C-S-H, reduzindo, assim, a largura dos poros capilares.

SANTOS (1992) acredita que algumas pozolanas possam apresentar efeitos benéficos sobre as reações álcali-agregado, inibindo-as ou impedindo-as, por serem capazes de reagir ou adsorver os álcalis liberados pelo cimento (geralmente expressos por K_2O e Na_2O). Esta opinião é compartilhada por MEHTA (1987), que cita duas correntes de pesquisa sobre o assunto. Segundo ele, alguns pesquisadores acreditam que a reação álcali-agregado é causada pela pressão osmótica, quando o gel de silicatos alcalinos absorve grandes quantidades de água. Dependendo do tamanho dos grãos, reatividade e percentual de material pozolânico na amostra, o gel poderia ser distribuído uniformemente ao longo do concreto, evitando a formação de uma massa concentrada do gel, que poderia causar pressão osmótica localizada suficiente para a ruptura. Entretanto, outros pesquisadores acreditam que, na presença de material pozolânico, ao invés de gel de sílica alcalina, são formados silicato de cálcio alcalinos de baixa razão álcali/agregado, que possui solubilidade mais leve. Entretanto, o autor alerta que nem todas as pozolanas naturais são efetivas no combate à reação álcali-agregado. A figura 3.2 apresenta a expansão percentual de uma amostra de terra de Santorini, em relação ao tempo de cura.

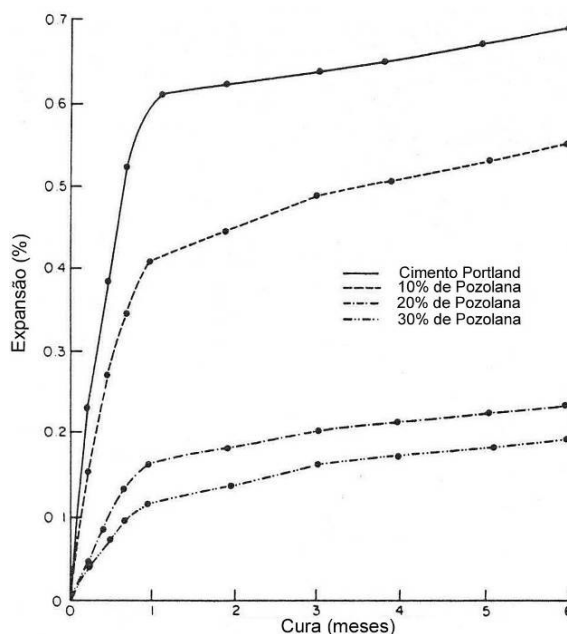


Figura 3.2 – Expansão (%) X cura
Fonte: MEHTA, 1981 apud MEHTA, 1987.

MIELENZ (1950, apud Santos, 1992), descreve resumidamente as vantagens e desvantagens decorrentes do emprego de pozolanas em concretos, a saber:

Vantagens:

- A reação álcali-agregado pode ser muito retardada ou inibida;
- A resistência do concreto ao ataque por águas naturais, especialmente as ricas em sulfato, pode ser aumentada;
- A produção de calor por estruturas maciças pode ser reduzida;
- A quantidade e o custo do componente cimento podem ser reduzidos;
- A resistência à tração do concreto pode ser aumentada;
- A permeabilidade do concreto pode ser reduzida;

- Propriedades antes no início da pega podem ser melhoradas (trabalhabilidade, tendência à segregação e exsudação de água).

Desvantagens:

- Aumento do consumo de água, com conseqüente aumento da retração por secagem;
- Possível diminuição da resistência à compressão;
- Possível diminuição da resistência ao congelamento e/ou descongelamento;
- Diminuição da velocidade de endurecimento e desenvolvimento da resistência mecânica;

O efeito de adições pozolânicas sobre o calor de hidratação foi estudado por MASSAZZA e COSTA (1979) apud MEHTA(1987). Os pesquisadores demonstraram a redução do calor de hidratação com o uso de adições pozolânicas, conforme apresentado pela figura 3.3. Pode-se observar que a relação de decréscimo do calor de hidratação não é proporcional ao percentual de cimento Portland substituído.

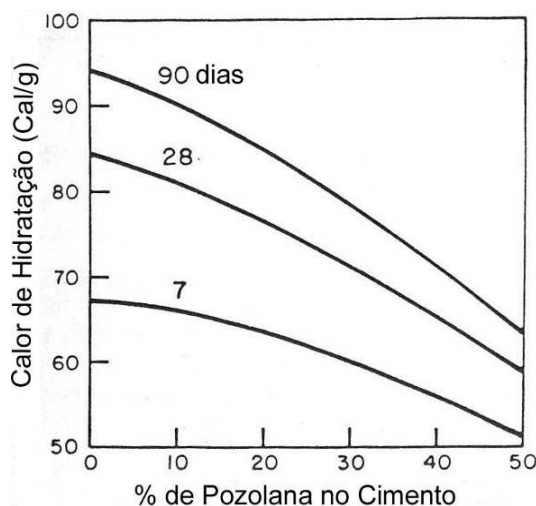


Figura 3.3 – Calor de hidratação X % de material pozolânico
Fonte: MASSAZZA e COSTA (1979) apud MEHTA (1987).

Além dos temas já abordados neste capítulo, MEHTA (1987) também pesquisou as propriedades de concretos contendo adições pozolânicas, entre elas: desenvolvimento da resistência à compressão, resistência ao ataque de sulfatos e a retração por secagem. As figuras 3.4 e 3.5 mostram os resultados dos ensaios de resistência à compressão executados pelo ele.

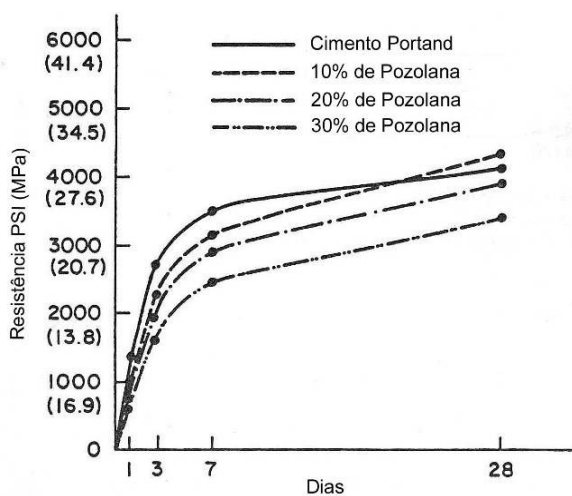


Figura 3.4 – Resistência à compressão até 28 dias
Fonte: MEHTA, 1981 apud MEHTA, 1987.

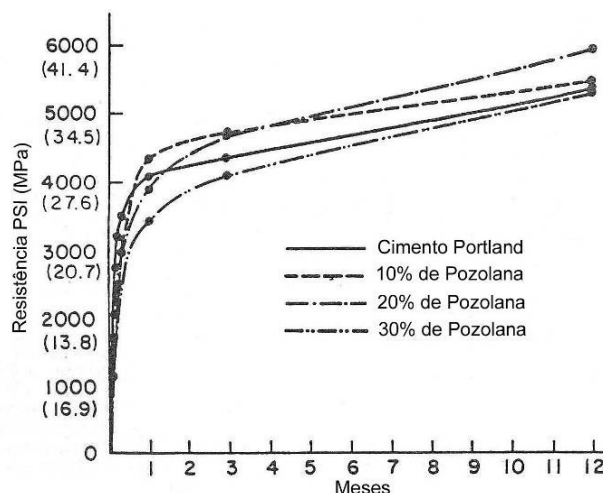


Figura 3.5 – Resistência à compressão até 1 ano
Fonte: MEHTA, 1981 apud MEHTA, 1987.

Até o vigésimo oitavo dia, as amostras contendo pozolana apresentaram incremento substancial à resistência. Entretanto, após um ano, os resultados das amostras contendo 20 e 30% de terra de Santorini ficaram muito próximo ao padrão de referência, e a amostra contendo 10% de pozolana teve um desempenho melhor que o padrão.

Em relação à retração por secagem, amostras contendo cimento Portland-pozolana comumente apresentam maiores valores se comparadas à amostras com somente cimento Portland. Entretanto, o autor cita que nem sempre isto ocorre. Segundo ele, existem duas explicações prováveis para os valores de retração de amostras contendo pozolana nem sempre sejam tão altas quanto o esperado. A primeira é que o efeito restringente do agregado na retração da pasta é mais determinante que a influência da pozolana sobre a amostra. Outra teoria é a de que a presença de pozolana na amostra torna a zona de transição pasta-agregado mais forte, se comparada à amostra sem pozolana, considerando-se a mesma relação água/cimento. Neste caso, há um aumento da resistência à tração e à flexão, com conseqüente aumento da resistência à retração.

A figura 3.6 mostra a retração por secagem percentual em relação ao tempo de cura de amostras contendo terra de Santorini.

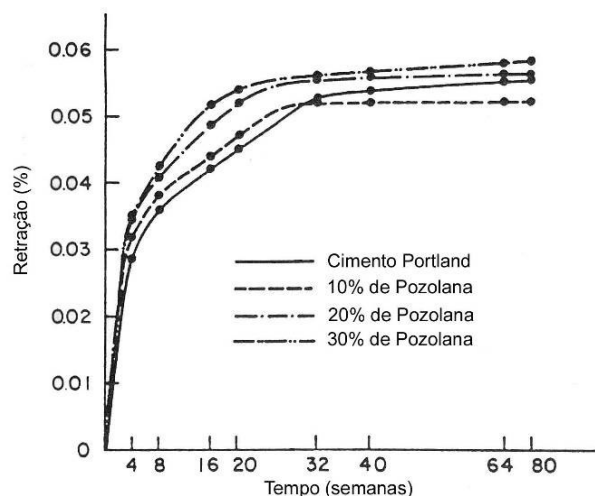


Figura 3.6 – Retração por secagem X tempo
Fonte: MEHTA, 1981 apud MEHTA, 1987.

Quanto à resistência ao ataque de sulfatos, MEHTA afirma que a adição de material pozolânico ao cimento Portland traz benefícios, pois a reação pozolânica, além de diminuir a permeabilidade do concreto, também forma produtos mais resistentes aos sulfatos (C-S-H com baixa relação CaO/SiO_2). As tabelas 3.3 E 3.4 apresentam os resultados das pesquisas do autor sobre a expansão e a resistência à compressão de corpos-de-prova imersos em solução de sulfatos.

Tabela 3.3 - Expansão de corpos-de-prova imersos em sulfatos (solução 10% Na_2SO_4)

AMOSTRA	EXPANSÃO			
	4 semanas	8 semanas	12 semanas	26 semanas
Cimento Portland	0,004	0,034	0,212	0,520
10% Terra de Santorini	0,006	0,018	0,071	0,285
20% Terra de Santorini	0,007	0,010	0,048	0,050
30% Terra de Santorini	0,006	0,008	0,027	0,050

Fonte: MEHTA, 1981 apud MEHTA, 1987.

Tabela 3.4 - Perda de resistência à compressão (solução 4% Na₂SO₄)

AMOSTRA	RESISTÊNCIA ANTES DA IMERSÃO (MPa)	RESISTÊNCIA APÓS 28 DIAS DE IMERSÃO	PERDA DE RESISTÊNCIA
Cimento Portland	18,0	6,1	65%
10% Terra de Santorini	18,5	9,5	49%
20% Terra de Santorini	16,1	12,9	20%
30% Terra de Santorini	15,2	12,8	16%

Fonte: MEHTA, 1981 apud MEHTA, 1987.

Ambos os resultados demonstraram a superioridade das amostras contendo 20 e 30% de adição pozolânicas. Entretanto, assim como ocorre nas informações sobre as reações álcali-agregado, nem todas as pozolanas melhoram a durabilidade do concreto quanto ao ataque de sulfatos.

Nos dias atuais, com o crescente emprego de adições pozolânicas aos cimentos e concretos, as vantagens e desvantagens descritas devem ser verificadas para cada caso, já que existem várias opções, com diferenças entre si quanto à composição e aplicações, conforme apresentado nos itens 2.1 e 2.2 do presente trabalho. Os problemas com o aumento de consumo de água, por exemplo, pode ser atenuado ou resolvido com a utilização de aditivos plastificantes ou superplastificantes. Já os problemas relacionados com a retração plástica podem ser solucionados por métodos eficazes de cura.

3.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE ADIÇÕES DE CERÂMICA VERMELHA MOÍDA

SANTOS (1992) considera que a atividade pozolânica é tanto maior quanto for o teor de sílica amorfa (não cristalina) do material. Entretanto, o autor ressalta que não há uma quantificação exata que defina o teor de sílica para que o material seja considerado como pozolânico.

A potencialidade do uso da metacaulinita e dos resíduos de produção de tijolos cerâmicos queimados e finamente moídos, como substitutos parciais do cimento Portland, foram estudados por FARIAS FILHO, ROLIM e TOLEDO FILHO (2000). Nesse trabalho, os materiais foram caracterizados física, química e mineralogicamente, além de determinado o índice de atividade pozolânica com cimento Portland.

A tabela 3.5 e 3.6 apresentam, respectivamente, as características físico-químicas, resistência à compressão e índice de atividade pozolânica do tijolo moído e da metacaulinita.

Tabela 3.5 - Propriedades físico-químicas

PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS	CP II F 32	METACaulINITA	TIJOLO MOÍDO
SiO ₂ (%)	17,32	60,02	65,98
Fe ₂ O ₃ (%)	1,40	1,19	6,15
Al ₂ O ₃ (%)	6,70	29,91	23,25
CaO (%)	56,00	traços	nulo
MgO (%)	11,28	traços	traços
NaO ₂ (%)	0,06	nulo	1,35
K ₂ O (%)	0,73	traços	1,82
Perda ao Fogo (%)	5,58	8,60	0,85
Resíduo Insolúvel (%)	0,41	---	---
% Grãos <74 µm (via seco)	96,3	100	100
% Grãos <43 µm (via úmida)		69,2	71,2
Densidade (kg/dm ³)	3,10	2,69	2,69

Fonte: FARIAS FILHO, ROLIM e TOLEDO FILHO, 2000.

Tabela 3.6 - Atividade pozolânica com CP II F 32 após 28 dias de cura

	Traço em Peso	Resistência à Compressão (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica (%)
Referência (CP:areia:a/c)	1,0:1,5:0,41	25,03	100
Tijolo Moído (CP+TM:areia:a/c)	0,65+0,35:1,5:0,41	31,80	127
Metacaulinita (CP+MC:areia:a/c)	0,65+0,35+1,5+0,41	34,85	139

Fonte: FARIAS FILHO, ROLIM e TOLEDO FILHO, 2000.

A tabela 3.7 apresenta o teor de hidróxido de cálcio presente na pasta dos corpos de prova após 28 dias de cura.

Tabela 3.7 - Hidróxido de cálcio presente na pasta após 28 dias de cura

Material	Substituição do Cimento Portland (%)	Teor de Hidróxido de Cálcio (%)
Tijolo Moído	20	7,02
Tijolo Moído	40	4,04
Tijolo Moído	50	3,30
Metacaulinita	20	6,19
Metacaulinita	40	2,13
Metacaulinita	50	0,78

Fonte: FARIAS FILHO, ROLIM e TOLEDO FILHO, 2000.

A tabela 3.6 indicou a boa reatividade pozolânica que ambos os materiais apresentam, com vantagem para a metacaulinita.

Tanto a metacaulinita quanto o tijolo moído, apresentaram valores significativos de SiO_2 e Al_2O_3 , comprovando a potencialidade destes materiais quanto à atividade pozolânica. A tabela 3.7 confirma esta teoria, mostrando o decréscimo do teor de hidróxido de cálcio em função do aumento da substituição do cimento Portland.

A tabela 3.8 apresenta a evolução da resistência à compressão axial para argamassas, comparando um traço de referência, com traços contendo substituição do cimento Portland por 30% de tijolo queimado moído ou metacaulinita. É possível observar o ganho de resistência em todas as idades, mais acentuadamente aos 28 dias, confirmando a reatividade que estes materiais apresentam.

Tabela 3.8 - Resistência à compressão simples (MPa)

MISTURA	28 DIAS	90 DIAS	120 DIAS	200 DIAS	365 DIAS
Referência (1:1,5:0,41)	25,05	30,60	33,54	38,88	40,45
Tijolo Moído (0,7 CP + 0,3 TM) :1,5:0,41	31,71	33,35	35,32	40,17	40,50
Metacaulinita (0,7 CP + 0,3 MC):1,5:0,41	37,79	36,67	39,19	42,57	43,05

Fonte: FARIAS FILHO, ROLIM e TOLEDO FILHO, 2000.

4. CERÂMICA VERMELHA

4.1. INDÚSTRIA CERÂMICA

O setor industrial da cerâmica é bastante diversificado e pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica e isolantes térmicos.

O ramo da cerâmica vermelha compreende materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno.

Os dados do setor cerâmico brasileiro diferem entre as associações representativas. De acordo com a ABC (Associação Brasileira de Cerâmica), o setor é deficiente em dados estatísticos e indicadores de desempenho, dificultando uma visão global sobre o assunto. No caso específico da cerâmica vermelha, os dados apresentados pela ABC são empíricos, de acordo com valores obtidos em artigos científicos e junto ao mercado. Este levantamento é dificultado pela quantidade de empresas e sua distribuição, que atinge todo o território nacional.

As tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os dados do setor de cerâmica vermelha no Brasil, de acordo com a ABC e ANICER.

Tabela 4.1 - Cerâmica vermelha no Brasil (ano 2003)

CERÂMICA VERMELHA	
Número de Unidade Produtoras (empresas)	7.000
Número de Peças/Ano (bloco)	25.224.000
Número de Peças/Ano (telha)	4.644.000
Quantidade Produzida (em massa t/ano)	64.164.000
Matéria-Prima (argilas)	82.260.000
Produção Média por Empresa (peças/mês)	365.000
Faturamento (R\$ bilhões)	4,2
Empregos Diretos	214.000

Fonte: ABC, 2007a.**Tabela 4.2 – Cerâmica no Brasil**

	N.º DE EMPRESAS	% POR ÁREA	PRODUÇÃO (PEÇAS/MÊS)	CONSUMO DE ARGILA (TON/MÊS)
Blocos / tijolos	3600	63	4 bilhões	7,8 milhões
Telhas	1900	36	1,3 bilhões	2,5 milhões
Tubos	12	0,1	325,5 km	
Empregos Diretos	400.000			

Fonte: ANICER, 2007.

Segundo a ABC (2007a), a indústria cerâmica tem participação no Produto Interno Bruto (PIB) estimado em 1%, correspondendo a cerca de 6 bilhões de dólares. Para a ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica, 2006), a indústria cerâmica vermelha corresponderia a 4,8% da indústria da construção civil brasileira, com faturamento anual de 6 bilhões de reais.

Embora haja discordância entre os dados das duas associações, os números são representativos da importância do setor cerâmico na economia brasileira. São mais de cinco mil empresas atuando na fabricação de cerâmica vermelha.

4.2 MATÉRIAS-PRIMAS DA CERÂMICA VERMELHA

As matérias-primas para produtos em grande escala (tijolos, blocos, refratários, etc.) tem origem na natureza, recebendo pouco ou nenhum beneficiamento prévio, diferentemente de cerâmicas para eletrônica ou eletrotécnica. A matéria-prima básica para fabricação de cerâmica vermelha é a argila, que corresponde à quase totalidade de sua composição.

A palavra “argila” vem do grego *árgilos*, que em latim chama-se argila (FERREIRA, 2004). O termo é utilizado para denominar e caracterizar uma gama de materiais, dependendo da área de atuação. Vulgarmente, é a designação de um solo de granulação fina, textura terrosa e comportamento plástico quando umedecidos.

A argila tem propriedades estruturas de um solo coesivo. Os argilominerais, quando na presença de água, são responsáveis pelas propriedades frescas das argilas, tais como: plasticidade, resistência mecânica a úmido, retração linear de secagem, compactação, tixotropia e viscosidade de suspensões aquosas.

Na mecânica dos solos e engenharia, o termo “argila” é dado ao material natural, classificado em ensaio de granulometria, composto por partículas extremamente pequenas, constituído essencialmente de argilominerais, principalmente silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, podendo conter outros minerais que não são argilominerais (quartzo, mica, pirita, hematita, etc.), matéria orgânica e outras impurezas (SANTOS, 1975).

O termo folhelhos é utilizado para designar rochas laminadas, estratificadas ou detríticas, cujos componentes possuam granulometria de siltes ou argilas, podendo possuir a mesma consistência que esta ou apresentar-se como um material adensado e duro, chamado de argilito (ABNT, 1995).

Sua composição, embora variável, é formada basicamente por silício, alumínio e água, com quantidades expressivas de ferro, metais alcalinos e alcalino-terrosos. Entretanto, alguns tipos de argilas, com as *flint-clays*, embora possuam boa parte destes atributos, não apresentam plasticidade quando misturadas à água (SANTOS, 1975). O termo não está relacionado à origem destes materiais, podendo designar solos provenientes de intemperismo, ação hidrotermal ou sedimentos (fluviais, marinhos, lacustres ou eólicos).

A NBR 6502 (ABNT, 1995) trata da terminologia aplicada aos materiais da crosta terrestre, rochas e solos, para fins de engenharia geotécnica e fundações. Algumas das definições apresentadas por ela são descritas a seguir:

- a) Argila: “solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade”.
- b) Fração argila: designa a parcela de um solo cujas partículas possuem diâmetros dentro da faixa granulométrica fixada para a argila.
- c) Argilominerais: Silicatos hidráulicos de alumínio, podendo conter quantidades variáveis de ferro, magnésio, potássio, sódio, lítio, etc. São geralmente formados por lamelas constituídas por estratos ou lâminas de tetraedros de SiO_4 e octaedros de $\text{Al}(\text{OH})_6$, possuindo cristalinidade variável. Os argilominerais se formam por alteração de minerais primários das rochas ígneas e metamórficas, como feldspatos, piroxênios e anfibólios, ou são constituintes de rochas sedimentares. Possuem a propriedade de absorver às superfícies de suas partículas quantidades variáveis de água e íons. Os principais grupos de argilominerais são: caulinita, micas hidratadas (Ex.: ilítas) e esmectitas.

- d) Caulinita: silicato hidratado de alumínio pertencente ao grupo das canditas, caracterizado por estrutura lamelar formada pelo empilhamento regular de camadas constituídas por uma folha tetraédrica de sílica e uma folha octaédrica de alumina.
- e) Ilita: argilomineral do grupo das micas hidratadas, formado por lamelas que são constituídas por dois estratos de tetraedros de silício e um de octaedro de alumínio. A sua estrutura é mais estável que a das esmectitas, impedindo a admissão de água interlamelar. Origina-se das micas por degradação (perda de K e ganho de H_2O), sem modificações estruturais. Possui capacidade de troca catiônica de média a baixa e expansão baixa.
- f) Esmectitas: formadas por lamelas constituídas por um estrato de octaedros de alumínio entre dois estratos de tetraedros. As esmectitas possuem a capacidade de admitir H_2O interlamelar, o que propicia uma elevada expansão. O principal argilomineral deste grupo é a montmorilonita.

SANTOS (1975) acredita na tendência de que os argilominerais se concentrem em faixas de diâmetro menores que 2 μm , defendendo que materiais “não-argilosos” geralmente estão ausentes abaixo deste diâmetro, sendo a melhor maneira de separação (quali-quantitativa) entre os argilominerais dos não-argilominerais.

Segundo PINTO (2000), dois tipos de estruturas estão presentes na composição química das argilas. Uma delas é formada por tetraedros justapostos num plano, com átomos de silício ligados à quatro átomos de oxigênio (SiO_2). A outra, é formada por octaedros, onde átomos de alumínio são circundados por oxigênio ou hidroxilas $[Al(OH)_3]$.

Alguns argilominerais, como a caulinita, são formados por uma camada tetraédrica e uma octaédrica, chamada de “estrutura de

camada 1:1". Este tipo de constituição apresenta camadas firmemente empacotadas, com ligações de hidrogênio, que impedem a penetração de moléculas de água. A figura 4.1 apresenta a estrutura da caulinita e serpentine. As letras "G" e "B" representam camadas octaédricas ricas em cátions de alumínio e magnésio, respectivamente.

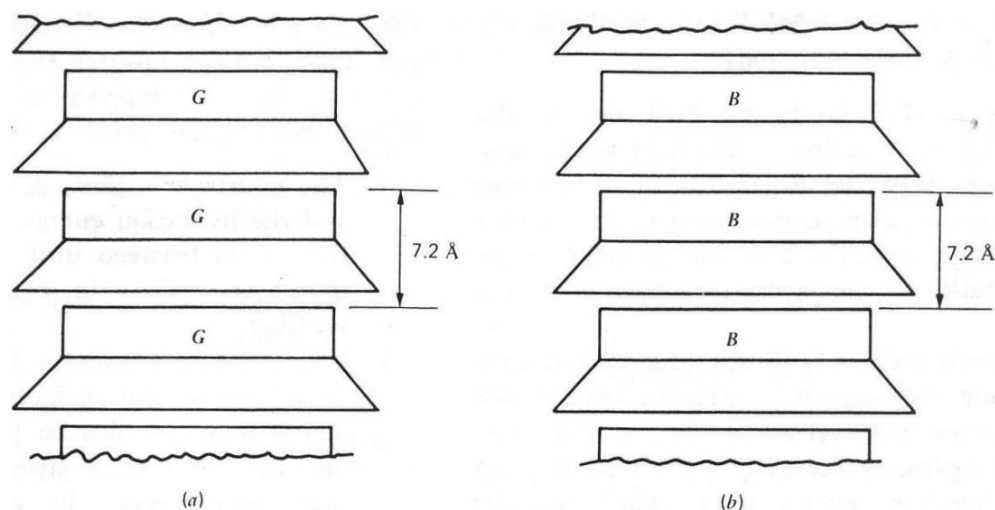


**Figura 4.1 – Diagrama das estruturas da caulinita (esquerda) e serpentine (direita).
Fonte: MITCHELL, 1976.**

Outro tipo de arranjo é composto por a estrutura octaédrica é encontrada entre duas estruturas tetraédricas ("estrutura de camada 2:1"). A esmectita e a ilita são exemplos deste tipo de formação. Diferentemente do arranjo anterior, as ligações entre as camadas é obtida através de íons O^{2-} e O^{2+} . Este tipo de ligação é mais fraca que a anterior. As figuras 4.2 e 4.3 apresentam, respectivamente, as estruturas da montmorilonita e saponita, e muscovita, ilita e vermiculita. As letras "G" e "B" representam camadas octaédricas ricas em cátions de alumínio e magnésio, respectivamente.

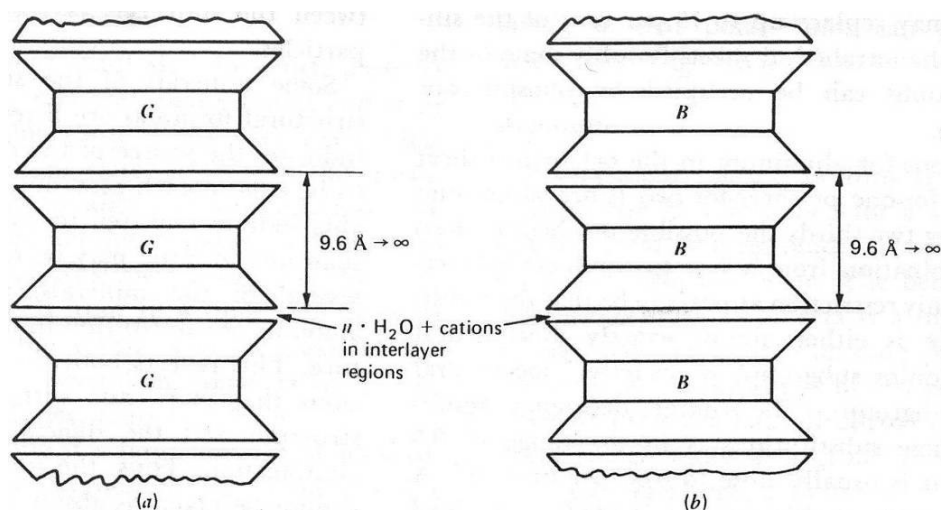


Figura 4.2 – Diagrama das estruturas da montmorilonita (esquerda) e saponita (direita).
Fonte: MITCHELL, 1976.

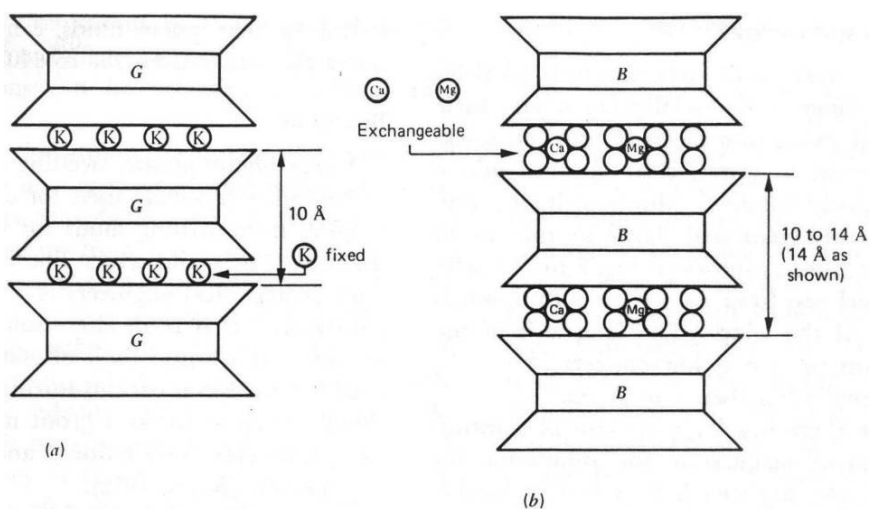


Figura 4.3 – Diagramas das estruturas da muscovita e ilita (esquerda), e vermiculita (direita).
Fonte: MITCHELL, 1976.

O que diferencia os argilominerais é basicamente o tipo de estrutura e as substituições que podem ocorrer, dentro da estrutura, do alumínio por magnésio ou ferro, e do silício por alumínio ou ferro, principalmente, e a conseqüente neutralização das cargas residuais geradas pelas diferenças de cargas elétricas dos íons por alguns cátions. É comum, por exemplo, a substituição de um átomo de silício (Si^{4+}) por um de alumínio (Al^{3+}) na estrutura tetraédrica. Já na

estrutura octaédrica, átomos de alumínio podem ser substituídos por átomos de menor valência, como os do magnésio (Mg^{2+}), conforme apresentado na figura 4.3.

Quando na presença de água, as partículas minerais da argila sofrem forças de atração e de repulsão entre elas. As forças de atração são determinadas pelas forças de Van Der Waals e de ligações secundárias, que atraem materiais adjacentes. As forças de repulsão decorrem das cargas líquidas negativas das partículas, quando as camadas duplas encontram-se em contato. A estrutura deste tipo de solo é determinada pela combinação destas forças. A liberdade de movimento das placas determina a capacidade de absorção de água de certas argilas, determinando a expansão e/ou contração das mesmas. A figura 4.4 apresenta o diagrama estrutural da haloisita hidratada e não-hidratada.

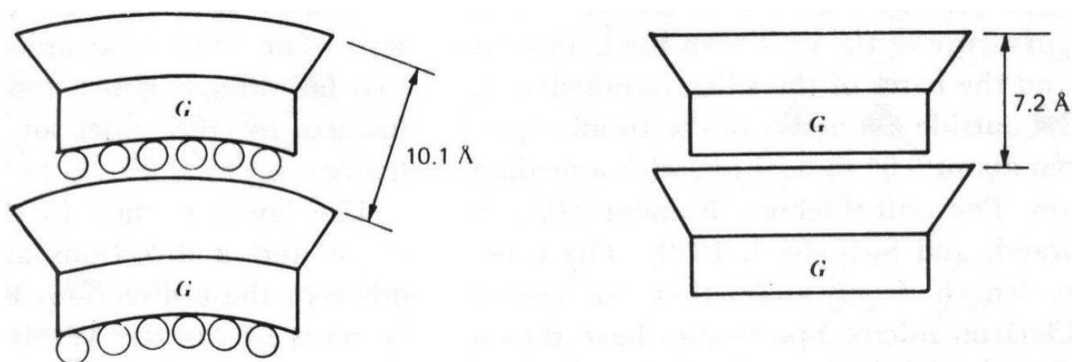


Figura 4.4 – Diagramas das estruturas da haloisita hidratada (esquerda) e não-hidratada (direita).

Fonte: MITCHELL, 1976.

As figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam as fotomicrografias de amostras de caulinita, haloisita e ilita.

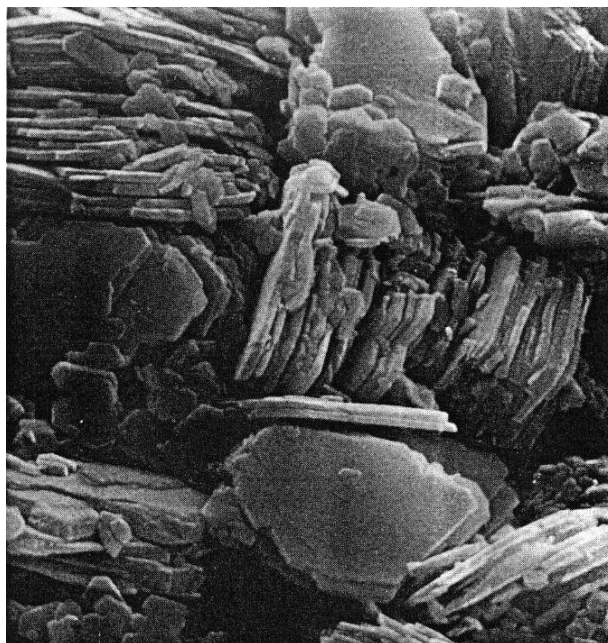


**Figura 4.5 – Caulinita de origem inglesa - 17 μm .
Fonte: TOVEY, 1971 apud MITCHELL, 1976.**

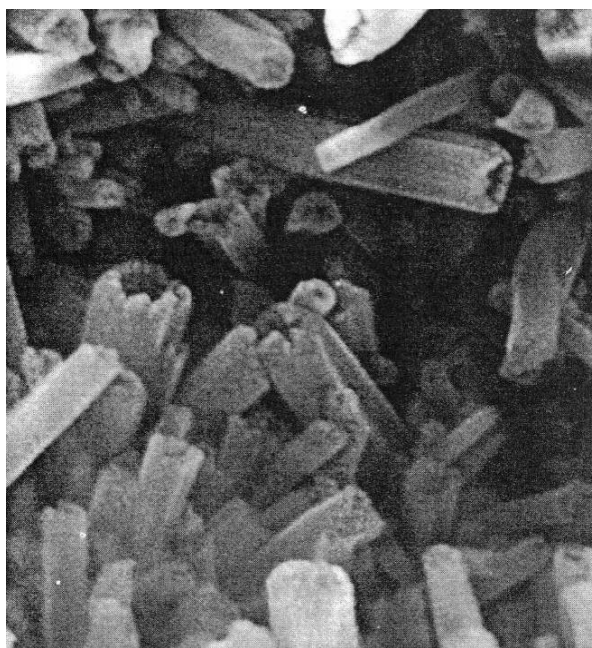


**Figura 4.6 - Haloisita de origem americana - 2 μm .
Fonte: TOVEY, 1971 apud MITCHELL, 1976.**

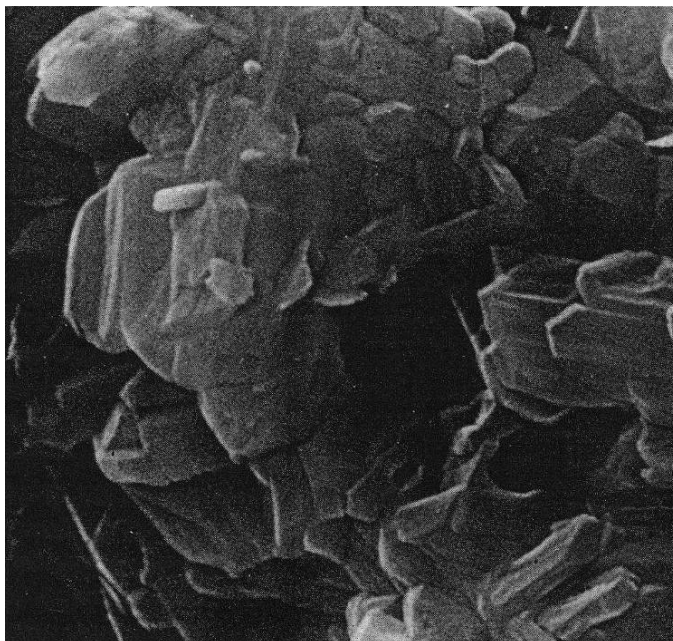


**Figura 4.7 - Illita de origem americana – 7,5 μm .
Fonte: TOVEY, 1971 apud MITCHELL, 1976.**

SANTOS (1975) considera que a caracterização de argilas é um problema complexo, face a variabilidade de suas propriedades, necessitando o emprego de técnicas sofisticadas, como microscopia eletrônica de transmissão e de varredura. Assim, propõe a determinação de suas propriedades como segue:

- I. Textura;
- II. Composição Mineralógica;
- III. Íons mutáveis;
- IV. Propriedades micrométricas (Granulometria, área superficial específica, forma dos grãos, porosidades, etc.);
- V. Sistema argila + água;
- VI. Propriedades tecnológicas.

Em alguns casos, em função da aplicação, as argilas podem receber designações próprias, decorrentes de aplicações tecnológicas, composição química/mineralógica ou origem geológica, como: caulins, bentonitas, argilas refratárias, flint-clays, ball clays e terra fuller.

As argilas mais apropriadas para utilização fabricação de cerâmica vermelha são aquelas que contêm em sua constituição os argilominerais ilita, de camadas mistas ilita-montmorilonita e clorita-montmorilonita, além de caulinita, pequenos teores de montmorilonita e compostos de ferro (ABC, 2007b).

5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

5.1 VISITA À OLARIA E AMOSTRAGEM

Foi realizada uma visita à fábrica de blocos cerâmicos no mês de agosto de 2006. Os resíduos são provenientes de uma olaria localizada no município de Ribeirão das Neves, situada na Região Metropolitana da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais.

Durante a visita, foram observados os processos produtivos, que serão descritos no item 5.3. Na unidade estudada, a produção de blocos cerâmicos oscila entre 350 e 400 t/dia útil. O percentual de perda é de aproximadamente 5% do total produzido (17,5 a 20 t/dia útil).

Na ocasião, foram coletados separadamente os resíduos de blocos de vedação e estruturais, que estavam empilhados juntos no pátio da empresa, à céu aberto. Para não haver dúvidas sobre os tipos de resíduos, optou-se pela coleta de blocos inteiros da pilha, separados manualmente pelo tipo de seção, que são diferentes (vedação ou estrutural). As amostras foram ensacadas, etiquetadas e transportadas para os laboratórios da Escola de Engenharia da UFMG.

Os resíduos são relativamente homogêneos, não sendo esperadas alterações significativas das suas características físico-químicas ao longo do tempo.

Não foi permitido o registro fotográfico das atividades, equipamentos, espaços da indústria e o processo de produção das peças cerâmicas.

5.2. RESÍDUOS CERÂMICOS

O estudo analisa separadamente as amostras de dois tipos de resíduo: blocos cerâmicos para alvenaria de vedação e blocos cerâmicos para alvenaria estrutural.

Trata-se do refugo da produção de tijolos/blocos. São peças que não apresentaram qualidade de acabamento, conformidade dimensional ou proveniente de quebras no processo produtivo, tornando-se inadequadas ao comércio. Estes resíduos são comumente chamados de chamote.

A figura 5.1 apresenta o resíduo de blocos cerâmicos para alvenaria estrutural.



Figura 5.1 – Bloco estrutural

5.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS

Na unidade fabril estudada, o processo produtivo dos blocos cerâmicos acontece da seguinte forma:

1. **Obtenção e Transporte da Matéria-Prima:** As argilas que serão utilizadas na fabricação dos blocos cerâmicos são obtidas de jazidas localizadas nos arredores dos municípios de Ribeirão das Neves e Vespasiano, ambos em Minas Gerais. São adquiridos três tipos de argilas diferentes, variando-se a plasticidade (teor de areia) entre elas.
2. **Preparação da Massa:** as argilas são misturadas entre si e com outro produto, denominado fercok, que é uma espécie de lama de alto-forno, que é adicionado no traço de 18:1 (em volume, argilas: fercok), com intuito de acelerar a queima e baratear o custo, com a diminuição do uso da matéria-prima original.

De acordo com CST (2007), a lama de alto-forno é um co-produto gerado após a etapa de lavagem do gás de alto-forno e a separação dos particulados sólidos. Devido a seu alto teor de carbono (cerca de 40%), ela proporciona um tempo de campanha (cozimento) do lote de tijolo ou telha menor que o usual, contribuindo para a economia de combustível. Esse tempo cai de algo em torno de 80 horas de cozimento para aproximadamente 48 horas. A presença do carbono contribui também para a o equilíbrio térmico dos fornos, evitando o cozimento mais rápido de parte do lote ou perda de parte que não foi cozido adequadamente devido às diferenças de temperatura no forno. Além disto, o teor de óxido de ferro presente na lama produz um incremento de resistência mecânica.

VIEIRA et al (2007), estudaram a incorporação de lama de alto-forno em cerâmica vermelha e consideraram que este resíduo possui granulometria adequada para esta finalidade. Entretanto, sugere que a adição de lama de alto forno seja inferior a 5% do peso da massa cerâmica, de modo a evitar possíveis efeitos deletérios às propriedades físicas e mecânicas da cerâmica, uma vez que sua pesquisa demonstrou o aumento da absorção de água, redução da tensão de ruptura à flexão e aumento da retração linear da cerâmica queimada. A tabela 5.1 apresenta a composição química da lama de alto forno estudada por esses autores.

Tabela 5.1 - Composição química de uma lama de alto-forno

CONSTITUINTES	LAMA DE ALTO FORNO (%)
SiO ₂	4,94
Al ₂ O ₃	2,22
Fe ₂ O ₃	57,91
TiO ₂	0,12
CaO	2,97
MgO	0,77
K ₂ O	0,29
Na ₂ O	1,18
ZnO	0,51
MnO ₂	0,54
P ₂ O ₅	0,15
SO ₃	1,89
Perda ao Fogo	26,22

Fonte: VIEIRA, MARTINS, MOTHE, SANCHEZ e MONTEIRO, 2007.

Na unidade estudada não há um controle tecnológico da dosagem dos materiais. A proporção entre os tipos de argila é feita de modo empírico, de acordo com a sensibilidade do operário, que avalia manualmente a plasticidade da massa.

Segundo a própria indústria, a mistura deve descansar, para promover uma melhor homogeneização. O tempo ideal para o

descanso é de uma semana, mas dificilmente consegue-se este tempo, sendo o mais comum o período de 72 horas, devido às necessidades de produtividade da indústria.

3. **Produção:** A massa é transportada e introduzida numa linha de produção mecânica, composta pelos seguintes equipamentos:

TRITURADOR ► LAMINADOR ► EXTRUSOR ► CORTADEIRA

A massa passa primeiro pelo triturador, que promove um melhor destorroamento e homogeneização. Segue então para o laminador, que tem a função de dar forma às peças.

Segundo ABC (2007b), existem diversos processos de conformação de produtos cerâmicos, entre eles a fundição, a prensagem, o torneamento e a extrusão, que é o modelo adotado pela unidade estudada. A massa cerâmica deve ter comportamento plástico para este tipo de processo.

A massa cerâmica é colocada numa extrusora (também conhecida como maromba), onde é forçada por um pistão ou eixo helicoidal, através de um molde, que dá forma à seção transversal desejada. A massa extrudada sai de forma contínua do equipamento, seguindo para a cortadeira, que promove o corte transversal da coluna, através de um fio de aço. A altura da peça, então, é dada pela velocidade da esteira.

O tijolo estrutural, quando produzido nas dimensões 39x14x19 (comprimento, largura e altura em centímetros) possui peso úmido aproximado de 12kg. Após a queima, o peso ficará entre 8,0 e 8,5 kg.

O tijolo de vedação, quando produzido nas dimensões 29x9x19 (comprimento, largura e altura em centímetros) possui peso úmido aproximado de 5,5 kg, e depois de queimado, de 3,6 a 4,0 kg.

4. **Secagem:** Após ser conformado, o bloco segue para uma câmara de secagem, onde permanece durante 18 horas, na temperatura entre 80 e 120 °C. Esta etapa tem a finalidade de retirar a água da massa de forma lenta e gradual, evitando que as peças sofram possíveis tensões durante a queima, evitando-se trincas e fissuras.
5. **Queima:** também conhecida como sinterização. O bloco segue para uma das câmaras do forno e passa por três fases:
 - i. Aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada;
 - ii. Tempo determinado na temperatura especificada;
 - iii. Resfriamento até temperaturas inferiores a 200 °C.

O forno utilizado é do tipo Hoffmann, contínuo, com canal para ventilação e retirada da umidade. As paredes são de tijolo cerâmico maciço, formando câmaras semi-independentes.

As peças são arrumadas em lotes de mil unidades dentro de cada câmara, dispostos sob aberturas existentes na estrutura superior do forno (teto), local por onde entra o combustível. A porta da câmara é selada com uma parede de alvenaria de tijolos maciços.

Conforme o fogo percorre uma das câmaras, a câmara adjacente é pré-aquecida pela transferência de calor entre elas.

O combustível utilizado nesta unidade é a lenha. O consumo do combustível é da ordem de 1 m³/h (720 m³/mês).

A figura 5.2 mostra uma visão da parte superior do forno, onde é possível observar as janelas superiores do forno, por onde é inserida a lenha. A figura 5.3 mostra a visão de dentro do forno através de uma das janelas, sendo possível observar a queima.



Figura 5.2 – Vista superior do forno



Figura 5.3 – Vista superior de uma janela de alimentação

Após ser pré-aquecida, a câmara recebe o combustível diretamente, até atingir a temperatura desejada (entre 800 e 1000 °C). Os blocos permanecem nesta temperatura durante uma hora.

Na fábrica em questão, assim como acontece na fase de mistura, não há qualquer controle tecnológico da temperatura de queima. Os ajustes de quantidade de combustível são feitos de acordo com a sensibilidade do funcionário responsável pela alimentação do fogo, que avalia a temperatura por meio da observação da coloração da chama.

Durante a queima ocorrem uma série de transformações em função dos componentes da matéria-prima, tais como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem dos grãos.

Após a queima, o material continua dentro da câmara durante algumas horas, resfriando lentamente.

A câmara é aberta e retiram-se as peças cerâmicas, que são inspecionadas visualmente, separando-se aquelas que apresentam defeitos, como quebras e trincas.

O processo todo, considerando todas as etapas de fabricação, dura cerca de 96 horas (4 dias).

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 mostram o esquema de um forno tipo Hoffman, com alimentação à gás.

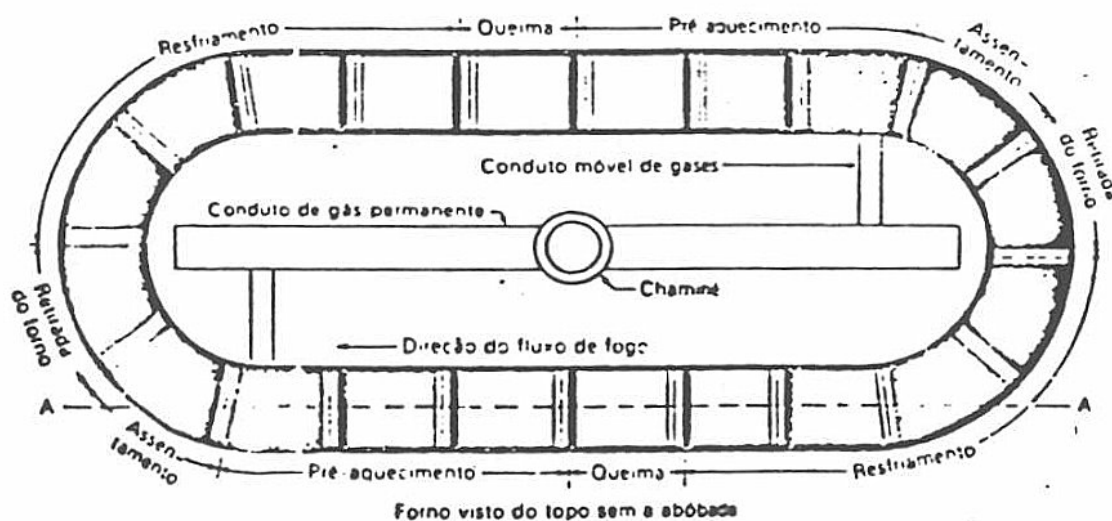


Figura 5.4 – Esquema de forno Hoffman – vista superior
Fonte: OSHIMOTO & THOMAZ, 1990.

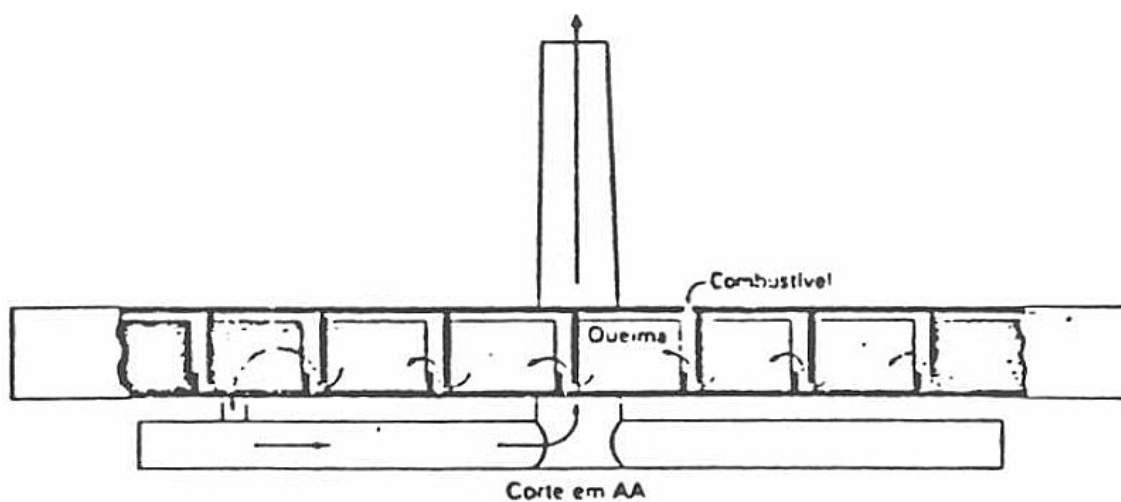


Figura 5.5 – Esquema de forno Hoffman – corte AA
Fonte: OSHIMOTO & THOMAZ, 1990.



Figura 5.6 – Esquema de funcionamento de forno contínuo
Fonte: OSHIMOTO & THOMAZ, 1990.

5.4 MOAGEM DOS RESÍDUOS

A segunda parte da pesquisa consistiu na avaliação da pozolanicidade do material. Para tanto, o resíduo cerâmico deve ser moído finamente, com percentual máximo de 34% retido na peneira #325 (45 μ m), segundo NBR 12653 (1992d).

1ª Tentativa de Moagem:

A primeira tentativa de moagem foi realizada no Laboratório de Concreto do DEMC.

Antes da moagem, os blocos foram triturados manualmente com um martelo, sem controle da granulometria de entrada no moinho. A figura 5.7 mostra uma das amostras antes da moagem.



Figura 5.7– Bloco cerâmico triturado manualmente

Utilizou-se um moinho de bolas, sempre com o torque máximo permitido pelo equipamento. Foram efetuadas moagens com cargas de 15 e 45 bolas de louça (1609,8 kg e 4840,1 kg, respectivamente) para a amostra do bloco de vedação. A figura 5.8 mostra o moinho utilizado nesta tentativa.



Figura 5.8 – Moinho utilizado na 1ª tentativa

Após 60 minutos de moagem, observou-se uma grande quantidade de material grosseiro. Os pedaços maiores apresentavam abrasão das arestas, ganhando formas arredondadas durante a moagem. Esta observação indicou a falha no processo de moagem, uma vez que o material não estava sendo triturado, mas apenas desgastado. A figura 5.9 apresenta uma das amostras após a moagem, onde é possível observar pedaços grandes com formatos arredondados.



Figura 5.9 – Amostra após a 1ª tentativa de moagem

Fez-se, então, um peneiramento grosseiro, com peneira de malha 5,5 mm, que acabou por comprovar a ineficácia do método. Para a amostra do bloco estrutural foi realizada a moagem apenas com a carga de 45 bolas, apenas como comparativo em relação ao bloco de vedação. A tabela 5.2 mostra os percentuais retidos neste peneiramento.

Tabela 5.2 - Resultado do peneiramento da 1ª tentativa de moagem (60 minutos)

	AMOSTRA DE VEDAÇÃO		AMOSTRA ESTRUTURAL	
	15 bolas	45 bolas	15 bolas	45 bolas
Peso (g)	4456,0	4456,0	-	4456,0
% retido	52,5	51,9		39,7

2ª Tentativa de Moagem:

A segunda tentativa de moagem foi realizada nas dependências do Laboratório de Tratamento de Minérios da UFMG. Desprezaram-se as amostras que já haviam sido moídas anteriormente, para que não houvesse influência na nova metodologia.

Para avaliar a eficiência da energética da moagem, optou-se por fazer uma britagem prévia do material utilizando-se um britador de mandíbulas. Os blocos foram colocados inteiros, na forma como foram coletados, nas mandíbulas do equipamento, permitindo a padronização do material que entraria no moinho posteriormente. As figuras 5.10 e 5.11 apresentam, respectivamente, o britador e parte do material britado.



Figura 5.10 – Britador de mandíbulas



Figura 5.11 – Amostra britada

Após a britagem, as amostras foram peneiradas, fornecendo a granulometria de entrada, conforme apresentado nas tabelas 5.3 e 5.4, respectivamente para bloco de vedação e estrutural.

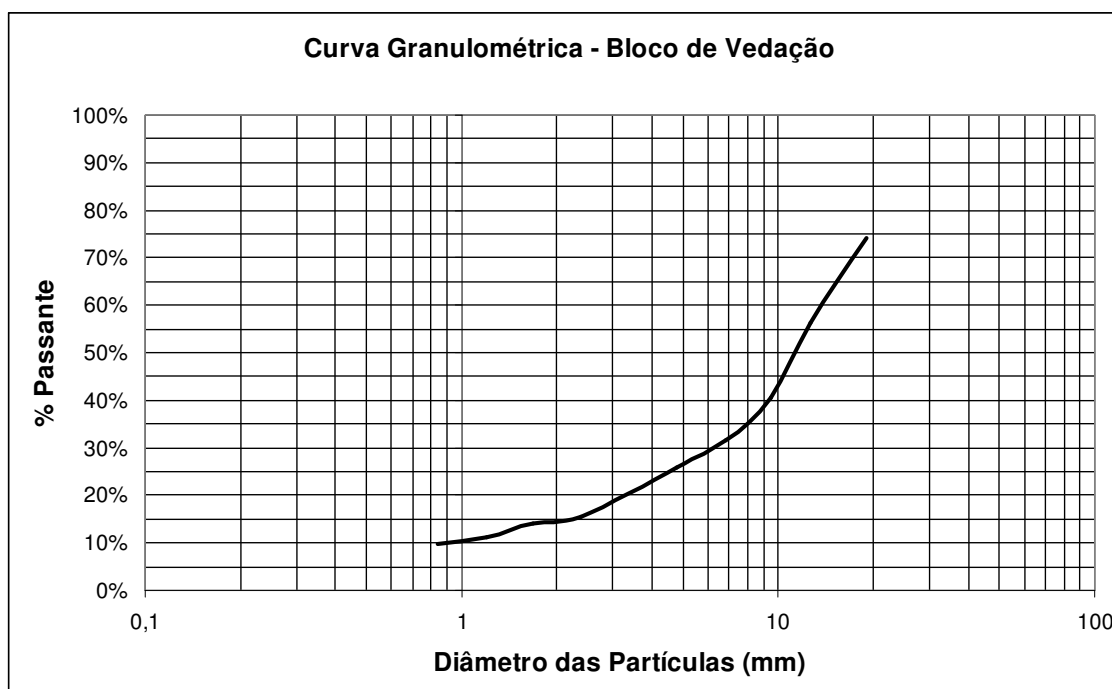
Tabela 5.3 - Granulometria após britagem (bloco de vedação)

		Peneira (mm)	% Passante Acumulado
Bloco de Vedação	Peso da Amostra = 6,875 kg	19	74%
		12,7	56%
		9,52	41%
		6,8	32%
		4,76	26%
		2,38	16%
		1,68	14%
		1,2	11%
		0,84	10%
		0	0%

Tabela 5.4 - Granulometria após britagem (bloco estrutural)

Bloco Estrutural Peso da Amostra = 8,640 kg	Peneira (mm)	% Passante Acumulado
	19	73%
	12,7	53%
	9,52	35%
	6,8	26%
	4,76	19%
	2,38	7%
	1,68	6%
	1,2	2%
	0,84	0%
	0	0%

As figuras 5.12 e 5.13 apresentam as curvas granulométricas dos materiais, após a britagem.

**Figura 5.12 - Granulometria de entrada no moinho (bloco de vedação)**

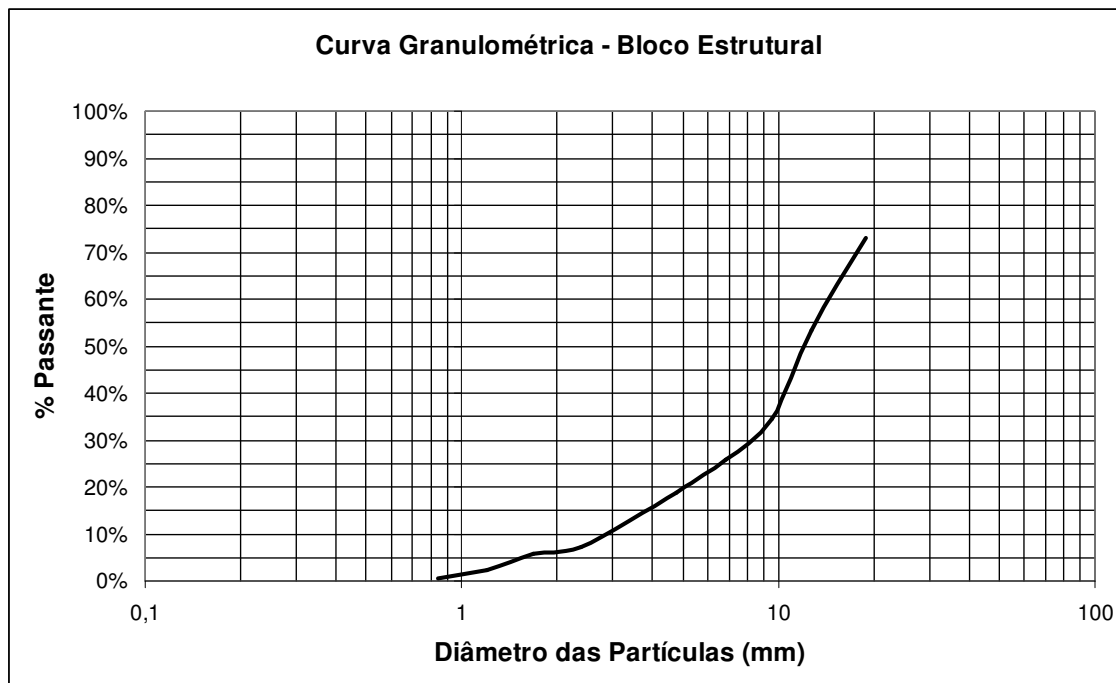


Figura 5.13 - Granulometria de entrada no moinho (bloco estrutural)

As amostras apresentaram granulometria próxima após a britagem, mesmo possuindo formatos construtivos diferentes.

Após a britagem, as amostras foram moídas num moinho de bolas maior do que o utilizado na primeira tentativa, com volume aproximado de 50 litros, utilizando-se uma carga de bolas de ferro fundido correspondente à 30% do volume. A rotação aplicada foi de 52 RPM.

Após 30 minutos de moagem, foi retirada uma amostra do material para avaliação. O resíduo foi peneirado a seco nas malhas #200 e #325. Este tipo de peneiramento mostrou-se ineficaz, pois o material aglutinava-se durante o processo, possivelmente devido à polarização das cargas elétricas presentes nas partículas, considerando-se o baixo peso dos grãos, que se atraem. Assim, passou-se ao peneiramento por via úmida durante 30 minutos. O material então foi pesado e levado à estufa durante 48h.

O tempo total de moagem foi de 150 minutos, com amostragens em 30, 60 e 90 minutos. A tabela 5.5 apresenta os valores obtidos pelo peneiramento.

Tabela 5.5 - Percentual retido acumulado após 2ª tentativa de moagem

Tempo (min)	% RETIDO ACUMULADO			
	Vedação		Estrutural	
	#200	#325	#200	#325
30	22	34	35	46
60	16	26	17	32
90	13	21	10	23
150	3	8	5	16

Os resultados mostram que, para ambas as amostras, após 60 minutos de moagem o material retido na peneira #325 (45 μm) é menor que 34%, conforme exigido pela NBR 12653 (ABNT, 1992d) para classificação de materiais pozolânicos (tabela 2.2).

As amostras apresentaram colorações diferentes após a moagem. A amostra de bloco de vedação possui uma coloração avermelhada, enquanto a amostra de bloco estrutural possui aspecto mais acinzentado, conforme apresentado pelas figuras 5.14 e 5.15.



Figura 5.14 – Amostra de vedação após a moagem



Figura 5.15 – Amostra estrutural após a moagem

Devido à metodologia adotada, com a análise apenas dos grãos retidos nas peneiras #200 e #325, foram utilizadas amostras entre 50 e 100 gramas para o peneiramento à úmido. Isto ocorreu para que não houvesse perdas significativas do material que continuaria a ser moído, o que poderia influenciar a análise posterior da moagem. Entretanto, a pouca quantidade amostrada e a dificuldade no peneiramento de um material fino, geraram perdas ao longo do ensaio, que podem ter influenciado nos resultados.

Assim, para uma conferência destes valores, optou-se pela análise granulométrica por meio de outros métodos: Cyclosizer Warman e granulômetro a laser, conforme apresentado nos itens 4.5.1 e 4.5.2.

5.5 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

Para caracterização dos resíduos, além do peneiramento por via úmida (#200 e #325), foram efetuados os seguintes ensaios:

- Granulometria por elutriação (Cyclosizer Warman);
- Granulometria a laser;
- Massa específica (picnômetro a gás);
- Área superficial específica (método de BET);
- Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX);
- Difração de raios-X (DRX);
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Microanálise (EDS);
- Determinação da atividade pozolânica em cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento - NBR 5752;
- Determinação da atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico aos 14 dias - NBR 5753.

5.5.1 Granulometria por elutriação (Cyclosizer Warman)

Além do peneiramento tradicional, utilizou-se também a granulometria por elutriação centrífuga (“*Cyclosizer*”). O *Cyclosizer* é um equipamento comumente utilizado na indústria de mineração. Possui maior precisão que o peneiramento tradicional para partículas menores que 45 µm. O equipamento separa os grãos em frações mais ou menos homogêneas, mediante a sedimentação numa corrente ascendente de água que passa por colunas verticais.

A corrente de fluido promove a aceleração centrífuga das partículas, cuja velocidade permite a permanência dos grãos em suspensão e sua subsequente separação. São cinco colunas interligadas, que permitem a separação de cinco diferentes frações granulométricas. Depois de determinado tempo, as colunas são esvaziadas separadamente em bécheres e depois filtradas. Os filtros de papel foram levados à estufa por 48h e depois pesados.

As frações granulométricas são dadas por uma fórmula específica, que correlaciona os dados do ensaio (vazão aplicada e temperatura) e os valores obtidos na filtragem. O equipamento é calibrado de acordo com valores padrão de temperatura, vazão, densidade aparente e tempo de elutriação.

A fórmula para correção destes parâmetros é dada por (MONTENEGRO, 2006):

$$d_e = d_i \times f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4$$

Onde:

- a) d_e = Tamanho efetivo de separação;
- b) d_i = Tamanho limite de separação;

- c) f_1 = fator de correção para a temperatura;
- d) f_2 = fator de correção para vazão;
- e) f_3 = fator de correção para densidade;
- f) f_4 = fator de correção para o tempo de elutriação.

O tamanho efetivo de separação (d_e) representa o diâmetro no qual uma porcentagem do material fica retida, de forma análoga ao peneiramento tradicional.

Os parâmetros medidos durante o ensaio, para ambas as amostras, foram:

- Temperatura = 25 °C;
- Vazão = 11,45 l/min (rotâmetro = 190mm);
- Tempo = 20 minutos.

A densidade das amostras, conforme ensaio descrito no item 4.5.4, é de 2,81 g/cm³ e 2,82g/cm³, respectivamente para bloco de vedação e estrutural.

A tabela 5.6 apresenta os fatores de correção utilizados para as variáveis do ensaio. Os valores de densidades dos blocos são muito próximos, não ocasionando diferença significativa no fator f_3 .

Tabela 5.6 - Fatores de correção

	f_1 (TEMPERATURA)	f_2 (VAZÃO)	f_3 (DENSIDADE)	f_4 (TEMPO)
	25 °C	190 mm / 11,45 l/min	2,81 g/cm ³	20 min
FATOR DE CORREÇÃO	0,94	1,008	0,955	0,955

Fonte: MONTENEGRO, 2006.

As tabelas 5.7 e 5.8 apresentam os resultados do ensaio, respectivamente para as amostras dos blocos de vedação e estrutural.

Tabela 5.7 - Granulometria por elutriação (vedação)

Tamanho Limite (µm)	Tamanho Efetivo (µm)	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
42,7	36,9 +/- 0,5	16	84
30,5	26,4 +/- 0,5	25	75
22,1	19,1 +/- 0,5	30	70
15	13,0 +/- 0,5	37	63
12	10,4 +/- 0,5	43	57

Tabela 5.8 - Granulometria por elutriação (estrutural).

Tamanho Limite (µm)	Tamanho Efetivo (µm)	% Retido Acumulado	% Passante Acumulado
42,7	36,9 +/- 0,5	19	81
30,5	26,4 +/- 0,5	27	73
22,1	19,1 +/- 0,5	33	67
15	13,0 +/- 0,5	41	59
12	10,4 +/- 0,5	49	51

O método de elutriação centrífuga apresentou resultados satisfatórios quanto às exigências da NBR 12653 (ABNT, 1992d). Ambas as amostras obtiveram valores inferiores à 34% retido na peneira #325.

5.5.2 Granulometria a Laser

Apesar do material em estudo já possuir uma caracterização granulométrica obtida por meio de peneiramento à úmido (apenas #200 e #325) e Cyclosizer Warman, optamos pela execução do ensaio de granulometria a laser, com o intuito de se comprovar a faixa de valores encontrada nos outros ensaios, já que os métodos e

equipamentos apresentam precisões diferenciadas, de acordo com o tamanho e distribuição dos grãos.

O granulômetro utilizado no ensaio foi da marca Sympatec, modelo Helos 12LA.

Após a limpeza do equipamento, foi introduzida uma solução dispersante (hexametáfosfato de sódio, em solução de 0,05%) para facilitar a detecção e leitura pelo equipamento. O equipamento executa uma leitura inicial da solução, que servirá como padrão de referência.

Antes de ser colocada no granulômetro, a amostra passou pelo equipamento de ultra-som, com o intuito de destorroar as partículas, evitando-se possíveis fontes de erros. As concentrações do dispersante utilizado para as amostras de vedação e estrutural foram de 22% e 20%, respectivamente.

Cada amostra foi ensaiada utilizando-se lentes de 20 e 50 mm. Este procedimento teve como objetivo confirmar e comparar os dados obtidos, pois as lentes possuem precisões diferentes. A lente de 20 mm é mais precisa na faixa de 0,18 a 35,00 μm , enquanto a de 50 mm tem desempenho melhor entre 0,45 e 87,50 μm .

A tabela 5.9 e as figuras 5.16, 5.17, 5.18 e 5.18 apresentam os resultados do ensaio.

Tabela 5.9 - Granulometria a laser

Bloco de Vedação				Bloco Estrutural			
20 mm		50 mm		20 mm		50 mm	
Diâmetro das Partículas (µm)	% Passante Acumulado	Diâmetro das Partículas (µm)	% Passante Acumulado	Diâmetro das Partículas (µm)	% Passante Acumulado	Diâmetro das Partículas (µm)	% Passante Acumulado
0,18	0,00	0,45	1,99	0,18	0,00	0,45	1,47
0,22	0,00	0,55	3,40	0,22	0,00	0,55	2,58
0,26	0,00	0,65	5,05	0,26	0,00	0,65	3,93
0,30	0,07	0,75	6,90	0,30	0,06	0,75	5,44
0,36	0,38	0,90	9,90	0,36	0,31	0,90	7,93
0,44	1,09	1,10	14,12	0,44	0,94	1,10	11,46
0,52	2,12	1,30	18,40	0,52	1,86	1,30	15,07
0,62	3,76	1,55	23,61	0,62	3,35	1,55	19,47
0,74	6,14	1,85	29,39	0,74	5,52	1,85	24,38
0,86	8,83	2,15	34,52	0,86	7,99	2,15	28,74
1,00	12,17	2,50	39,72	1,00	11,06	2,50	33,17
1,20	17,00	3,00	45,95	1,20	15,51	3,00	38,51
1,50	23,93	3,75	53,45	1,50	21,87	3,75	45,03
1,80	30,20	4,50	59,41	1,80	27,58	4,50	50,31
2,10	35,66	5,25	64,13	2,10	32,52	5,25	54,61
2,50	41,76	6,25	68,90	2,50	38,04	6,25	59,10
3,00	47,92	7,50	73,30	3,00	43,72	7,50	63,47
3,60	53,87	9,00	77,42	3,60	49,34	9,00	67,80
4,20	58,74	10,50	80,91	4,20	54,01	10,50	71,53
5,00	64,04	12,50	84,85	5,00	59,15	12,50	75,75
6,00	69,23	15,00	88,65	6,00	64,33	15,00	79,92
7,20	74,02	18,00	91,81	7,20	69,31	18,00	83,54
8,60	78,33	21,50	94,04	8,60	73,98	21,50	86,29
10,20	82,25	25,50	95,55	10,20	78,35	25,50	88,46
12,20	86,29	30,50	96,91	12,20	82,87	30,50	90,97
14,60	90,42	36,50	98,47	14,60	87,46	36,50	94,26
17,40	94,54	43,50	99,88	17,40	92,09	43,50	97,82
20,60	98,02	51,50	100,00	20,60	96,29	51,50	100,00
24,60	100,00	61,50	100,00	24,60	99,36	61,50	100,00
29,40	100,00	73,50	100,00	29,40	100,00	73,50	100,00
35,00	100,00	87,50	100,00	35,00	100,00	87,50	100,00

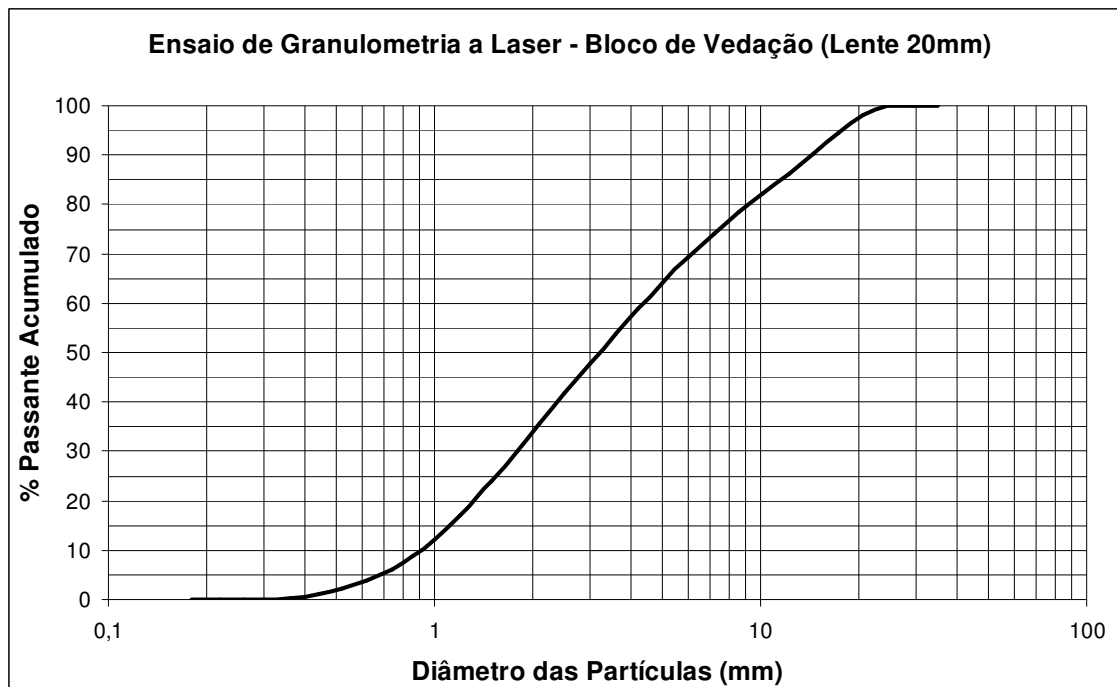


Figura 5.16 – Granulometria a laser - (lente = 20 mm – bloco de vedação)

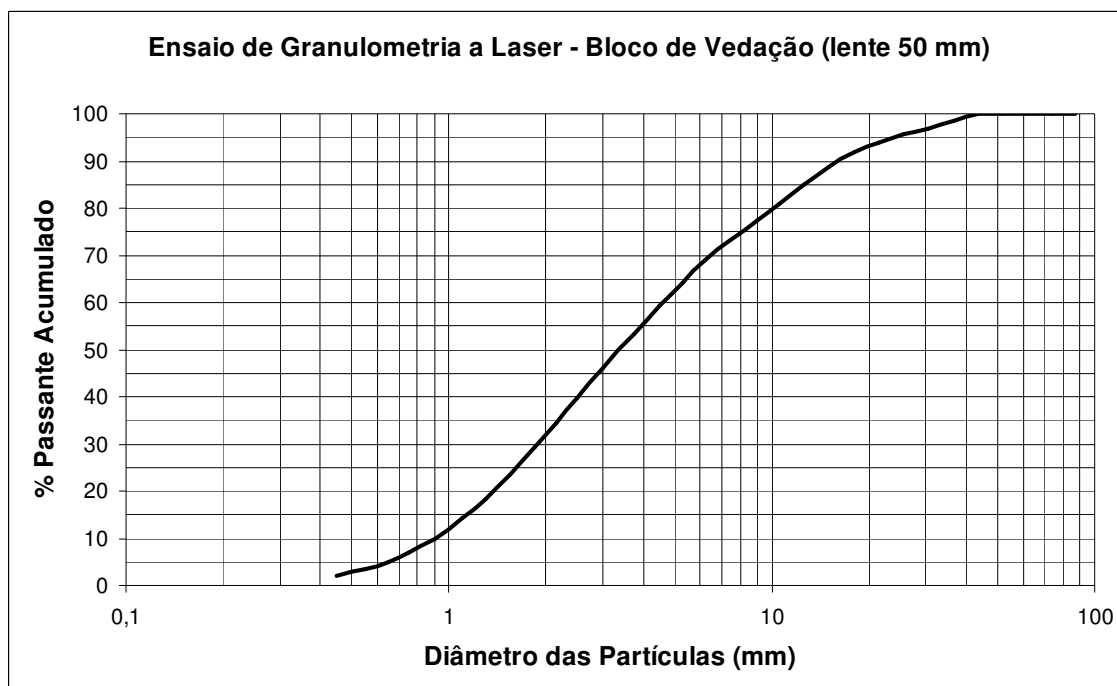


Figura 5.17 –Granulometria a laser - (lente = 50 mm – bloco de vedação)

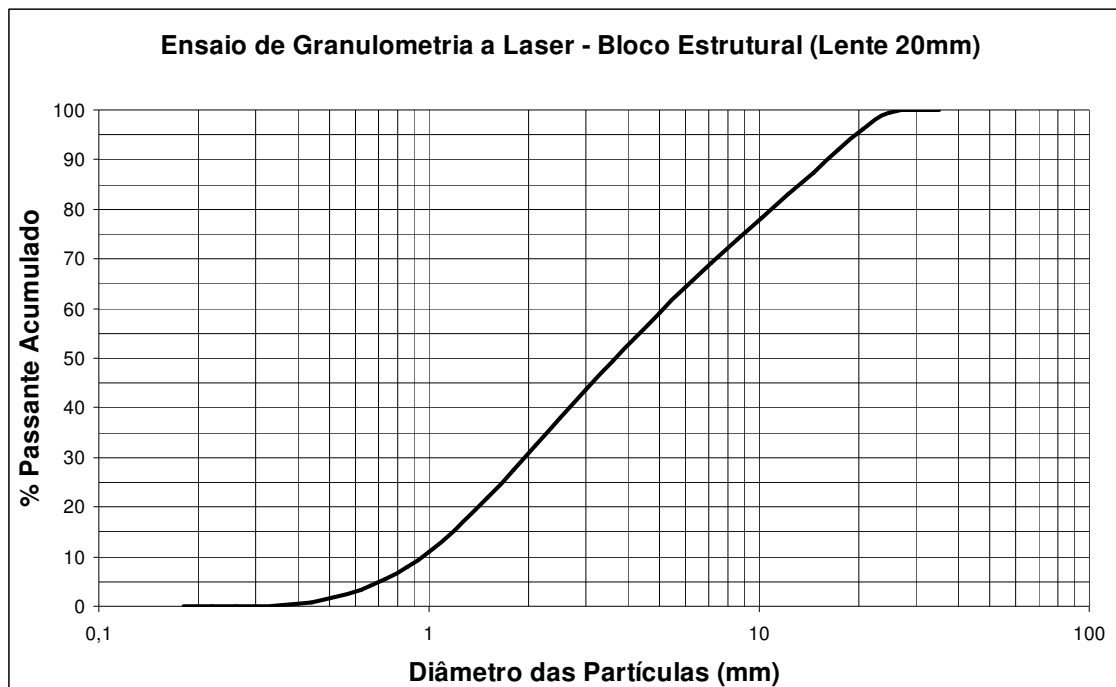


Figura 5.18 - Granulometria a laser - (lente = 20 mm – bloco de vedação)

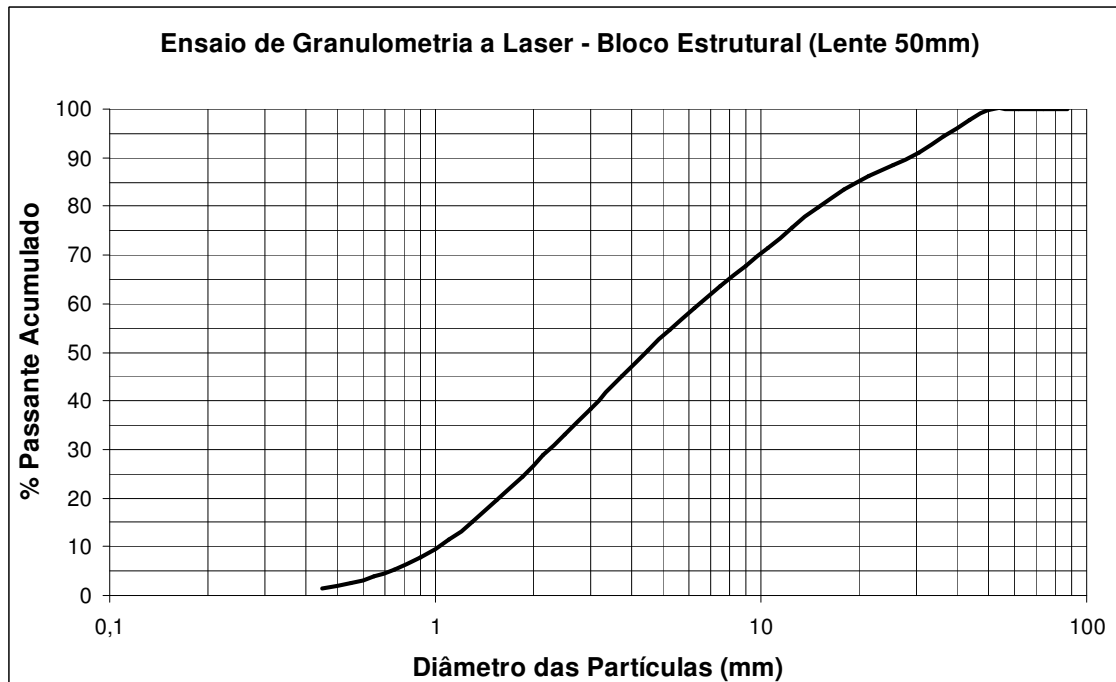


Figura 5.19 - Granulometria a laser - (lente = 20 mm – bloco de vedação)

As diferenças entre as curvas granulométricas entre as amostras foram pequenas, considerando-se o tempo e o método de moagem aplicado. Estas diferenças podem estar ligadas à queima e forma original de cada tipo de bloco. No entanto, a diferença entre as lentes aplicadas mostrou-se significativa. Enquanto a lente de 20 mm apresenta uma distribuição granulométrica abaixo de 25 μm (aproximadamente), a lente de 50 mm mostra partículas retidas em 44 μm (aproximadamente).

Considerações Sobre os Ensaios de Granulometria

Os métodos de ensaio de granulometria apresentaram diferenças entre si, mas são adequados à faixa granulométrica das amostras. Qualquer que seja o método escolhido, os resultados obtidos foram satisfatórios, qualificando o material para o uso pozolânico - com percentual máximo de 34% retido na peneira #325 (45 μm).

5.5.3 Densidade (Picnômetro a Gás)

Uma das técnicas mais utilizadas para determinação da densidade é utilizar o hélio como gás de intrusão, uma vez que as pequenas dimensões atômicas deste elemento asseguram uma penetração entre as cavidades e poros de até um Ångström.

A determinação da densidade foi feita utilizando-se um picnômetro a gás, marca/modelo Quanta Chrome Stereopycnometer. Os resultados do ensaio encontram-se no anexo B.

As densidades médias obtidas são praticamente iguais entre si (2,81 e 2,82 g/cm^3 , respectivamente para os blocos de vedação e estrutural). Estes valores são relativamente próximos àqueles obtidos por FARIAS FILHO, ROLIM e TOLEDO FILHO (2000) - 2,69 g/cm^3 - e VIEIRA (2000) - 2,72 g/cm^3 .

5.5.4 Área Superficial Específica

A área superficial específica (ASE) pode ser definida como a soma total da área superficial de um material particulado, por unidade de massa. Pode ser obtida por duas técnicas: a indireta (empírica), em que se usa o permeabilímetro de Blaine, e a direta (científica), por adsorção gasosa, baseada na equação de BET – Brunauer, Emmett e Teller (BRANDÃO, 2007).

A técnica de adsorção gasosa, utilizada neste ensaio, baseia-se no princípio de que a quantidade de um gás ou líquido fisicamente adsorvido sobre a superfície de uma amostra para formar uma monocamada é uma função direta da sua área superficial. A quantidade de gás adsorvido pode ser determinada por gravimetria, volumetria ou por uma técnica de fluxo contínuo. Antes de qualquer determinação de área superficial faz-se necessário a remoção de gases ou de vapores adsorvidos na superfície do sólido durante o seu processamento, manuseio ou armazenamento. A remoção desses gases ou vapores tem por objetivo evitar a redução ou variação da área superficial decorrente de uma prévia ocupação da superfície por outras moléculas. As condições de temperatura, pressão e tempo para a remoção de gás ou vapor adsorvido devem ser bem definidas a fim de que a determinação da área superficial da amostra seja reproduzida com máxima fidelidade. A medida da adsorção do gás é realizada a baixa temperatura uma vez que a quantidade de gás adsorvido numa dada pressão tende a baixar ou aumentar a temperatura durante o ensaio. Os dados gerados pela determinação são tratados de acordo com a conhecida função de Brunauer, Emmett e Teller (BET). (SANTOS, VEIGA e PINA, 2006).

Para a realização dos ensaios, as amostras foram secas em estufa (140 °C), para que a umidade não influenciasse a absorção do N₂ pela superfície das partículas dos materiais.

O método adotado para a obtenção da área superficial específica foi o de BET multiponto. Este ensaio consiste na injeção de dosagens de nitrogênio, que variam de baixa a alta densidade, com o intuito de achar vários pontos da isoterma. A quantidade de pressão de nitrogênio inserida inicialmente é conhecida como P_0 e a relação P/P_0 pode variar de 0,05 a 0,035, faixa onde o comportamento da isoterma é linear. O gráfico obtido pela relação volume (V) x P/P_0 fornece o valor do coeficiente linear “C” através do prolongamento da reta, no eixo vertical.

Os valores encontrados para a área superficial específica, segundo o método de BET, foram 8,46 m²/g e 4,26 m²/g, respectivamente para as amostras do bloco de vedação e estrutural.

A diferença entre os valores obtidos para cada amostra mostrou-se grande (cerca de 100%), considerando-se a paridade encontrada nos ensaios de granulometria e a natureza idêntica dos materiais. Além disto, estes valores são superiores aos valores médios obtidos em cimentos Portland, que variam entre 0,35 e 0,60 m²/g.

A ABNT, através das NBR's 5732 (1991a), 5733 (1991b), 5735 (1991c), 5736 (1991d) e 11578 (1991e), prescreve valores mínimos para a área superficial específica do cimento Portland comum e composto (a partir de $\geq 0,24$ m²/g), e cimento Portland de alta resistência inicial ($\geq 0,30$ m²/g).

Entretanto, mesmo sendo a ASE um parâmetro importante para a avaliação da finura do material, estando ligada diretamente à reatividade do mesmo, a ABNT não adota a ASE como exigência física para classificação dos cimentos Portland pozolânico e de alto forno.

Os resultados completos e gráficos (isotermas) do ensaio encontram-se no anexo A.

5.5.5 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

A análise por fluorescência de raios X é um método qualitativo, baseado na medida das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra (BOUMANS & KLOCKENKÄMPER, 1989 apud NASCIMENTO FILHO, 1999). Os raios X emitidos por tubos de raios X, ou raios X ou gama por uma fonte radioativa, excitam os elementos constituintes, os quais, por sua vez, emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra (NASCIMENTO FILHO, 1999).

A amostra consiste de uma pequena porção do material, com uma fina camada de ácido bórico em sua superfície, compactados manualmente em uma pequena forma metálica cilíndrica. O equipamento utilizado foi o Philips PW2400 Spectrometer.

Os resultados dos ensaios de espectrometria de raios X para as amostras do bloco de vedação e estrutural encontram-se dispostos sequencialmente no anexo C.

Os resultados de cada amostra são parecidos entre si, o que era esperado, posto que ambos possuem a mesma matéria-prima.

Os elementos com presença mais significativa são o silício (Si), oxigênio (O) e alumínio (Al), corroborando com a hipótese que as amostras possuam algum grau de pozolanicidade. Em nível baixo, apresentam-se o ferro e magnésio (Fe e Mg, respectivamente). Além destes, os resultados apresentam traços de zinco (Zn), níquel (Ni), manganês (Mn), cromo (Cr), titânio (Ti), cloro (Cl), cálcio (Ca), cério (Ce), fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S) e chumbo (Pb).

5.5.6 Difração de Raios-X

A difração de raios X ocorre devido ao espalhamento desses raios pelos átomos da rede cristalina. Quando os raios X são espalhados pelo ambiente ordenado de um cristal, ocorre a interferência entre os raios espalhados (tanto construtiva como destrutiva), pois as distâncias entre os centros espalhadores são da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da radiação, resultando, então, numa figura de difração, que é captada pelo equipamento e comparada com um banco de dados, fornecendo assim, um gráfico.

O equipamento usado foi da marca Philips, Série PW, regulado para 40KV de voltagem e 20mA de corrente (Figura 4). O step size foi de 0,060 e o ângulo de leitura variou entre 3 e 80.

Os espectros de difração de raios X são apresentados nas figuras 5.20 e 5.21, respectivamente, para as amostras de bloco de vedação e estrutural.

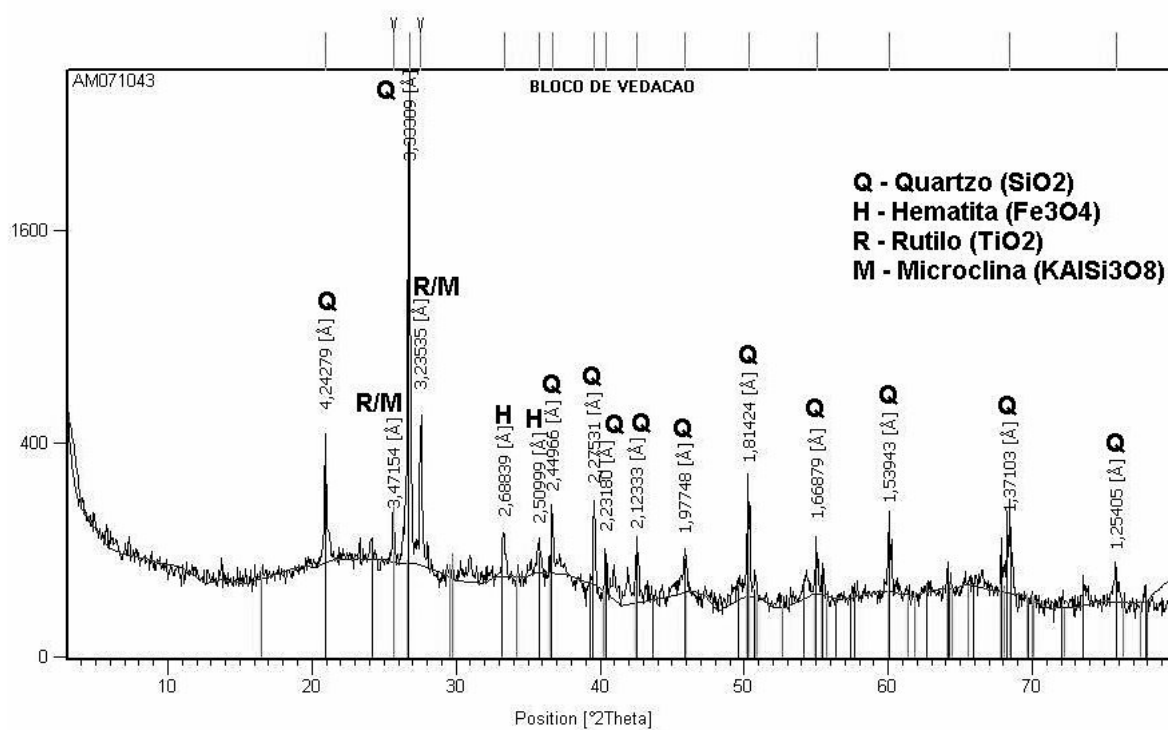


Figura 5.20 – Espectro de difração (bloco de vedação)

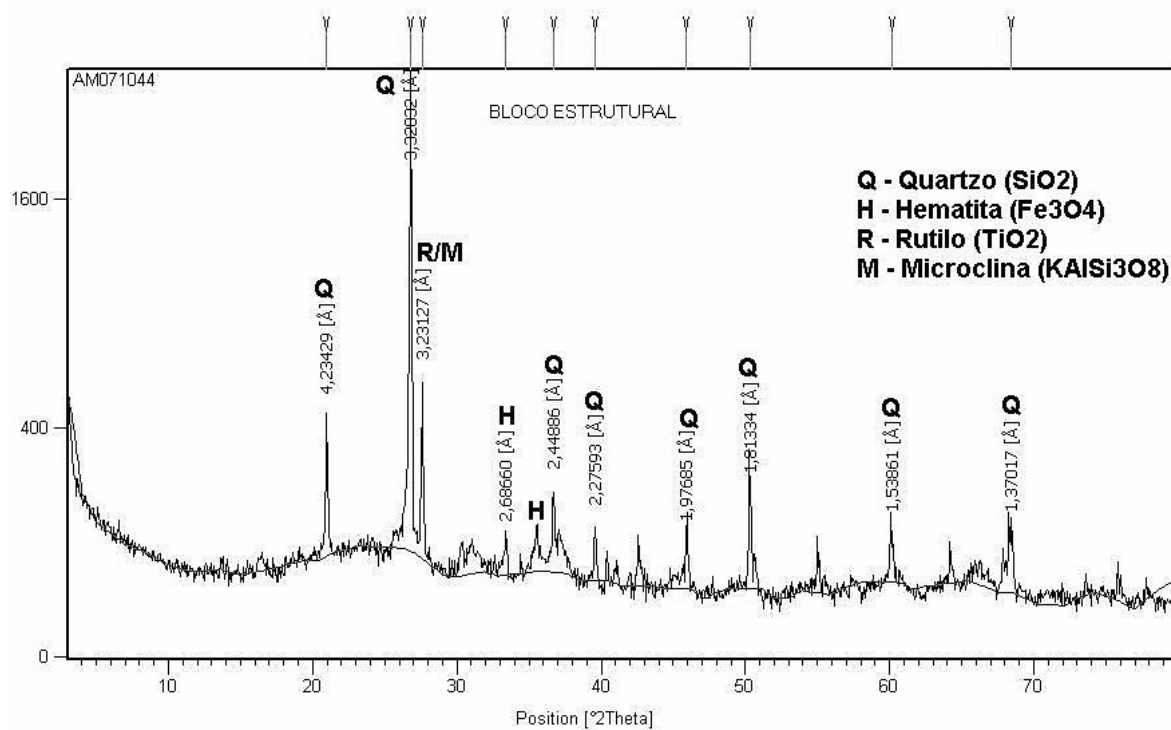


Figura 5.21 – Espectro de difração (bloco estrutural)

Ambos os difratogramas das amostras apresentaram materiais cristalinos em sua composição, como o quartzo e a hematita, e pequenos halos amorfos. Os espectros também mostram a presença de picos parcialmente identificados, provavelmente microclina e/ou rutilo, pois possuem elementos encontrados no ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X (Ti, Al, K, Si e O), conforme apresentado no item anterior. A presença de ambos os minerais dificulta a detecção precisa, pois um interfere na medição do outro.

5.5.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microanálise (EDS)

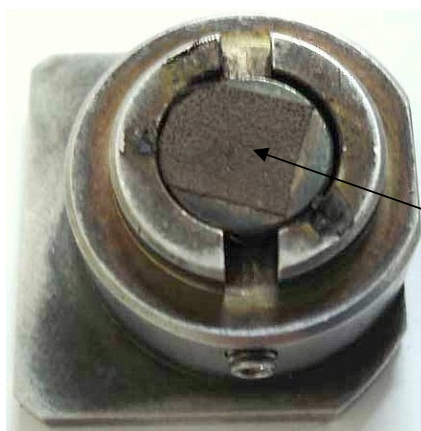
O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) obtém imagens a partir da varredura da superfície de uma amostra sólida por um padrão de rastreamento com um feixe de elétrons finamente focalizado. O procedimento consiste no deslocamento do feixe de elétrons sobre uma superfície em linha reta (direção x), que retornam à posição inicial e deslocam-se para baixo (direção y), com um incremento padrão. Esse processo é repetido até que uma área desejada da superfície tenha sido totalmente coberta. Durante o processo de varredura, um sinal é recebido acima da superfície (direção z) e armazenado em um computador, no qual ele é finalmente convertido em imagem.

Como o material não possui boa condutividade elétrica, a amostra recebeu uma capa metálica (“metalização”), de forma a melhorar sua condutibilidade. O material utilizado foi o ouro. Utiliza-se uma fita adesiva de dupla face, onde um dos lados é preso a um pequeno cilindro maciço de latão, e no outro é aderido o pó da amostra. Posteriormente, o cilindro é introduzido no aparelho metalizador (marca/modelo Denton Vacuum), permanecendo por cerca de 20 minutos, até obtermos uma baixa pressão. A amostra pode atingir a pressão de até 100 mili-tor, utilizando-se uma corrente de 10 mA. A partir daí o material foi exposto a uma nuvem de vapor de ouro

durante 30 minutos, promovendo a aderência do metal à superfície da amostra. As figuras 5.22 e 5.23 apresentam, respectivamente, o equipamento para a metalização e a amostra já metalizada.



Figura 5.22 – Metalizador



O pequeno quadrado no centro é a camada da amostra já recoberta pela película de ouro.

Figura 5.23 – Porta amostra do metalizador

Embora o tempo de exposição seja importante, a qualidade e a espessura da metalização dependem também de outros fatores. Desta forma, para uma quantificação química mais precisa, devemos

analisar e retirar as possíveis interferências do ouro na composição geral obtida.

O equipamento usado para a microscopia eletrônica foi da marca Jeol JSM-5410, que continha um EDS da marca NORAN acoplado a ele, conforme apresentado na figura 5.24.



Figura 5.24 – MEV e EDS

Durante a microanálise (EDS), podem ser utilizados dois tipos de elétrons: os secundários, que possuem melhor resolução e são indicados para mostrar a topografia (relevo) da amostra, e os elétrons retroespalhados, que fornecem imagens com melhor contraste.

A primeira amostra analisada foi a de bloco de vedação, seguida pela amostra de bloco estrutural. Para a imagem de partículas bem pequenas, próximas a 3 μm , foi retirado o tubo de elétrons retroespalhados e diminuiu-se a tensão, a fim de se obter uma melhor imagem.

Análise da Amostra de Bloco Cerâmico de Vedação

As figuras 5.25, 5.26 e 5.27 apresentam as imagens da amostra do bloco de vedação a partir de elétrons retroespalhados.

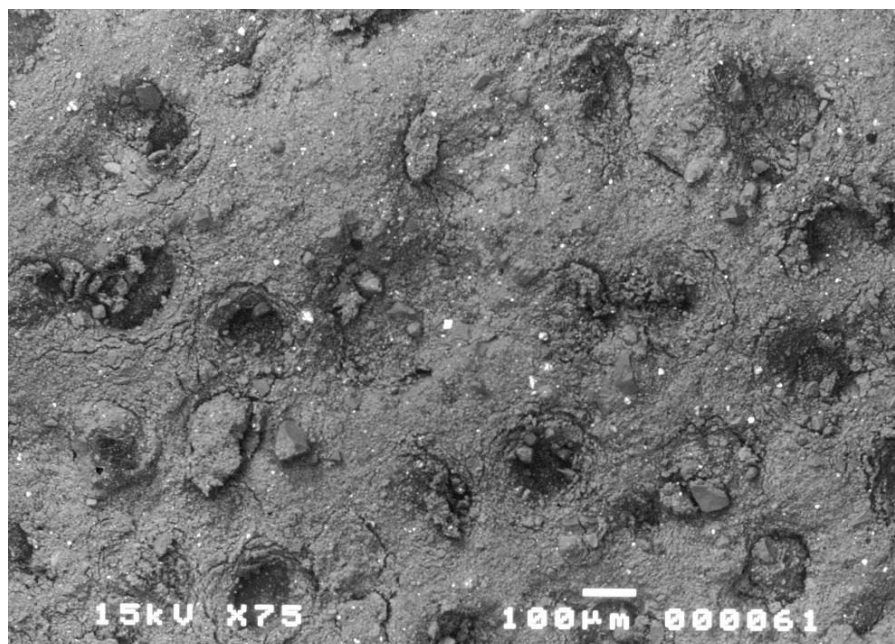


Figura 5.25 – Amostra de bloco de vedação (75 X)

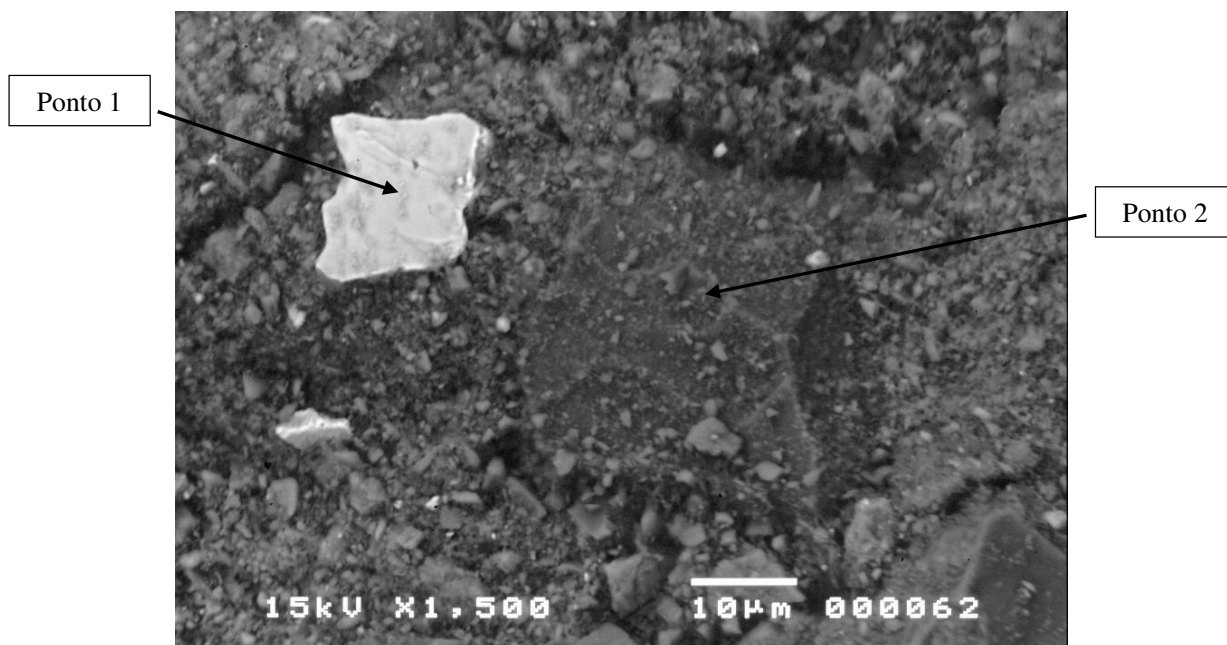


Figura 5.26 – Amostra de bloco de vedação (1500 X)

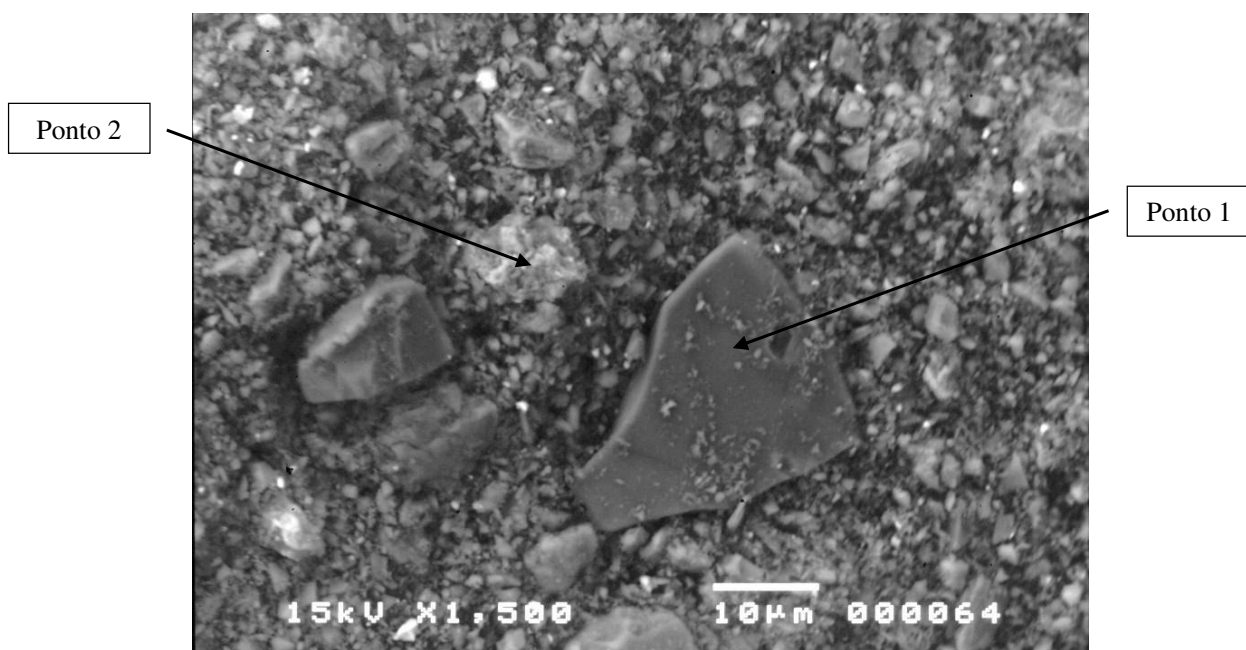


Figura 5.27 – Amostra de bloco de vedação (1500 X)

A tabela 5.10 apresenta um resumo da análise química geral para a área obtida com o EDS, com base na figura 5.25. A análise completa encontra-se no anexo D.

Tabela 5.10 – Análise química geral (bloco de vedação)

ÓXIDOS	% EM PESO
SiO ₂	51,40
Al ₂ O ₃	26,94
Fe ₂ O ₃	13,98
K ₂ O	2,73
ZnO	2,21
TiO ₂	1,28
CaO	0,57
MgO	0,55
Na ₂ O	0,34

Apesar de a análise ser obtida por meio de uma área muito pequena do material, os resultados mostram coerência com os elementos obtidos no ensaio de FRX. Há uma predominância dos óxidos de silício, alumínio e ferro, com quantidades menores dos óxidos de magnésio, potássio, titânio, sódio, cálcio e zinco. A soma dos percentuais de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ é de 92,32%, acima do valor mínimo exigido pela NBR 12653 (1992d), que é de 70%.

A tabela 5.11 apresenta um resumo da análise química obtida nos pontos demarcados nas figuras 5.26 e 5.27.

Tabela 5.11 – Análise química pontual (bloco de vedação)

ELEMENTO	FIGURA 5.26 (% EM PESO)		FIGURA 5.27 (% EM PESO)	
	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 1	PONTO 2
SiO ₂	2,26	92,83	97,68	33,31
Al ₂ O ₃	1,53	5,56	1,33	11,78
Fe ₂ O ₃	96,21	1,61	0,69	54,90

Na figura 5.26, a análise do ponto 1 apresenta uma grande quantidade de Fe₂O₃. Já o ponto 2 apresenta o que pode ser um grão de quartzo.

Na figura 5.27, a análise do ponto 1 também é rica em SiO_2 , no que provavelmente é uma partícula de quartzo. Já no ponto 2, a análise mostra a predominância de ferro, em menor proporção que na figura 5.26, sobre outras quantidades menores de silício e alumínio.

As figuras 5.28 e 5.29 apresentam as imagens da amostra do bloco de vedação utilizando eletros secundários, com aumentos de 5.000 e 7.500 vezes. Estas imagens apresentam uma quantidade enorme de partículas finas, com diâmetros de aproximadamente $1\ \mu\text{m}$, com morfologia irregular, que podem estar relacionados não só com a mineralogia, mas também com a moagem do material. Estas características podem ter influenciado nos valores obtidos no ensaio para a obtenção da área superficial específica (método de BET).

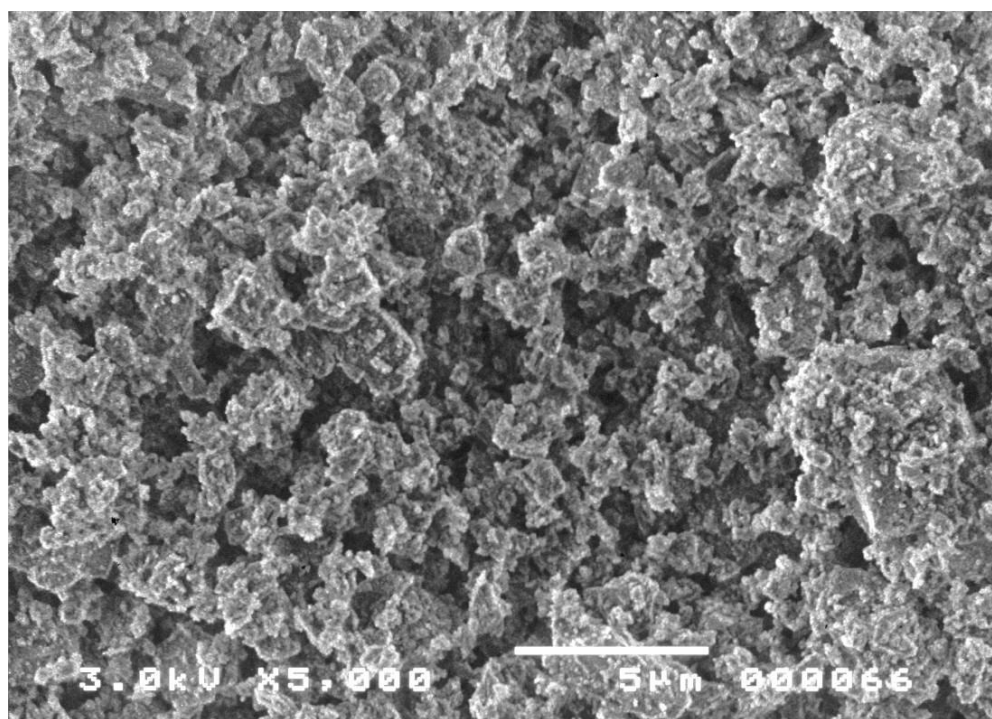


Figura 5.28 – Bloco de vedação (5000 X)

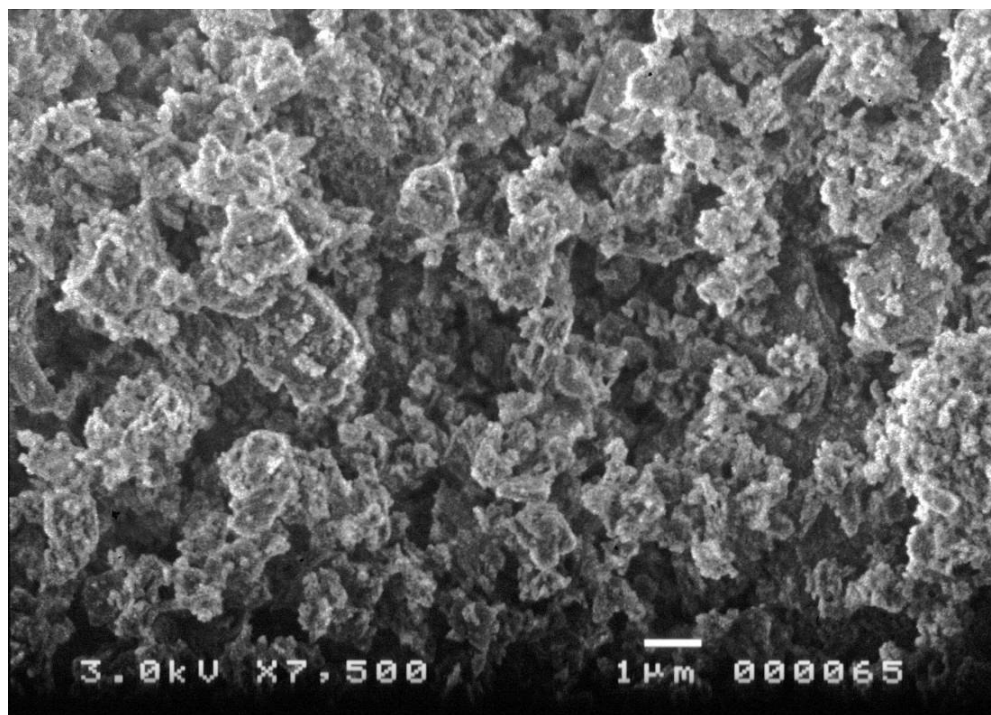


Figura 5.29 – Bloco de vedação (7500 X)

Análise da Amostra de Bloco Cerâmico Estrutural

As figuras 5.30, 5.31 e 5.32 apresentam as imagens da amostra do bloco estrutural a partir de elétrons retroespalhados.

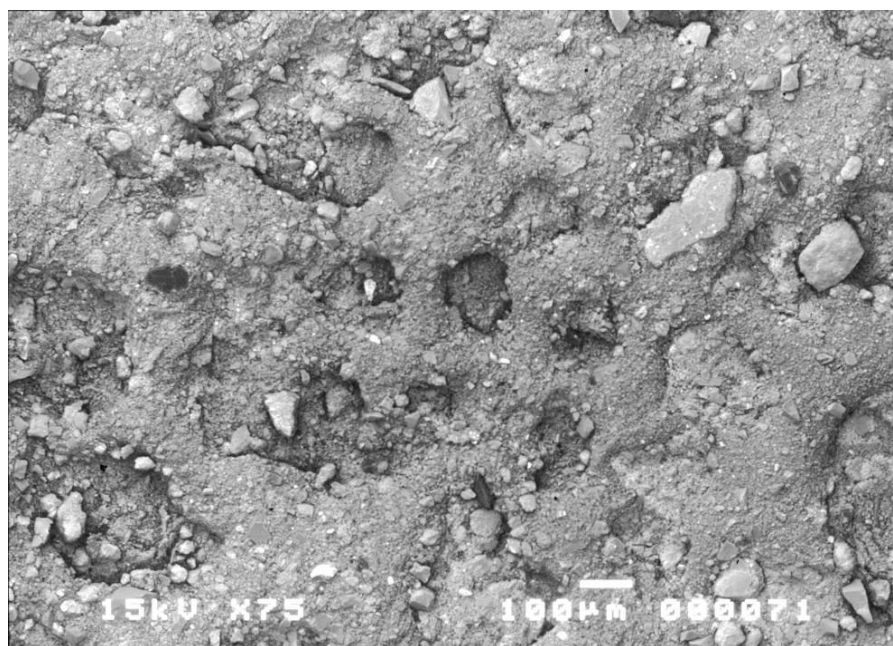


Figura 5.30 – Bloco estrutural (75 X)

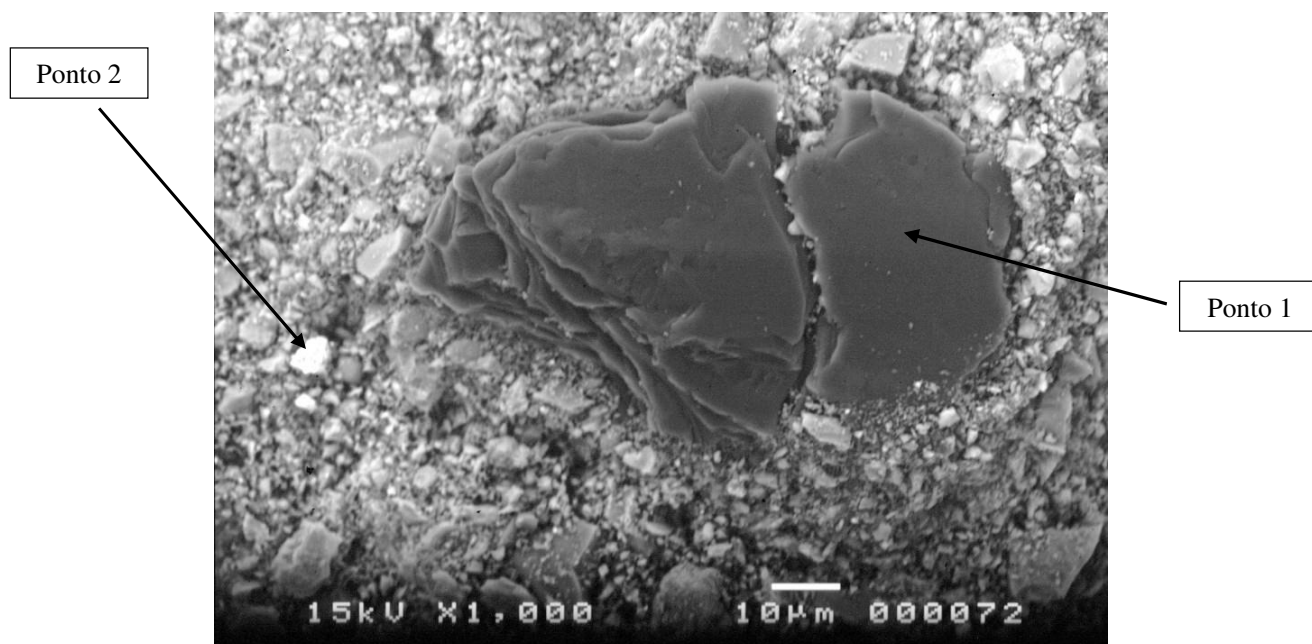


Figura 5.31 – Bloco estrutural (1000 X)

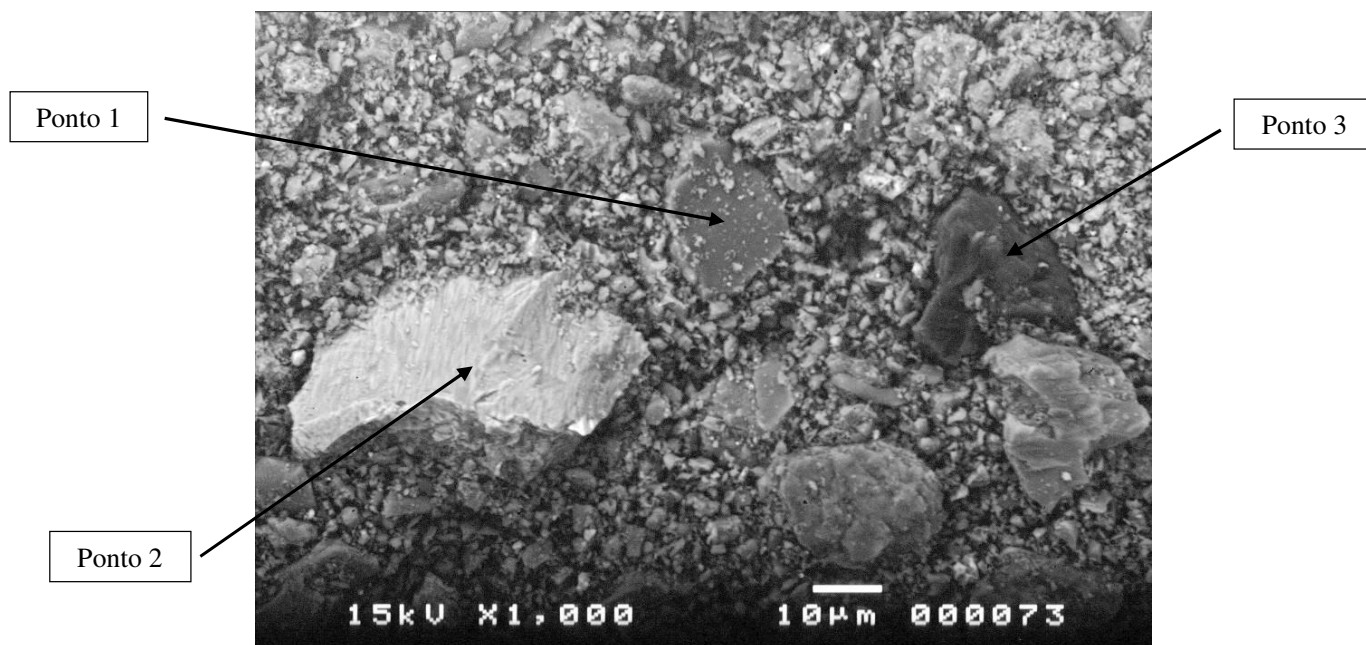


Figura 5.32 – Bloco estrutural (1000 X)

A tabela 5.12 apresenta um resumo da análise química geral para a área obtida com o EDS, com base na figura 5.30. A análise completa encontra-se no anexo D.

Tabela 5.12 – Análise química geral (bloco estrutural)

ÓXIDOS	% EM PESO
SiO ₂	55,10
Al ₂ O ₃	23,09
Fe ₂ O ₃	16,67
K ₂ O	2,61
TiO ₂	1,17
CaO	0,64
Na ₂ O	0,47
MgO	0,25

Assim como ocorreu com a amostra do bloco de vedação, apesar de a análise ser obtida por meio de uma área muito pequena do material, os resultados mostram coerência com os elementos obtidos no ensaio de FRX. Há uma predominância dos óxidos de silício, alumínio e ferro, com quantidades menores dos óxidos de potássio,

titânio, cálcio, sódio e magnésio. A soma dos percentuais de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 representam 94,86% da amostra, acima do valor mínimo exigido pela NBR 12653 (1992d), que é de 70%.

A tabela 5.13 apresenta um resumo da análise química dos pontos demarcados nas figuras 5.31 e 5.32.

Tabela 5.13 – Análise química pontual (bloco estrutural)

ELEMENTO	FIGURA 5.31 (% EM PESO)		FIGURA 5.32 (% EM PESO)		
	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3
C	100	---	---	---	100
SiO_2	---	1,26	99,45	2,83	---
Al_2O_3	---	0,64	0,55	2,07	---
Fe_2O_3	---	96,69	---	46,48	---
MnO	---	1,41	---	3,14	---
TiO_2	---	---	---	45,47	---

A análise química geral é muito parecida com a da amostra de bloco de vedação, como era esperado, corroborando mais uma vez com o ensaio de fluorescência de raios X.

A análise do ponto 1 da figura 5.31 e do ponto 3 da figura 5.32 apresenta 100% de carbono. Isto é explicado pela presença de cinzas de madeiras utilizadas no forno de queima da cerâmica e pela incorporação de lama de alto-forno durante a fabricação das peças.

No ponto 2 da figura 5.31, existe a predominância de óxidos de ferro sobre outros óxidos. A presença destes elementos provavelmente está ligada ao tipo de argila e ao fercok misturado à massa durante a fabricação.

Na figura 5.32, observa-se no ponto 2 a predominância de óxidos de ferro e titânio. No ponto 1 da figura 5.32 há a predominância de sílica, no que provavelmente é um grão de areia (quartzo).

As figuras 5.33 e 5.34 apresentam as imagens da amostra do bloco estrutural utilizando-se elétrons secundários, com aumentos de 5.000 e 7.500 vezes. Estas imagens apresentam uma quantidade enorme de partículas finas, com diâmetros de inferiores a 5 μm . Estas imagens são muito próximas àquelas obtidas com as amostras de bloco de vedação. Apresentam uma quantidade enorme de partículas finas, com diâmetros de aproximadamente 1 μm , com morfologia irregular, que podem estar relacionados não só com a mineralogia, mas também com a moagem do material. Estas características podem ter influenciado nos valores obtidos no ensaio para a obtenção da área superficial específica (método de BET).

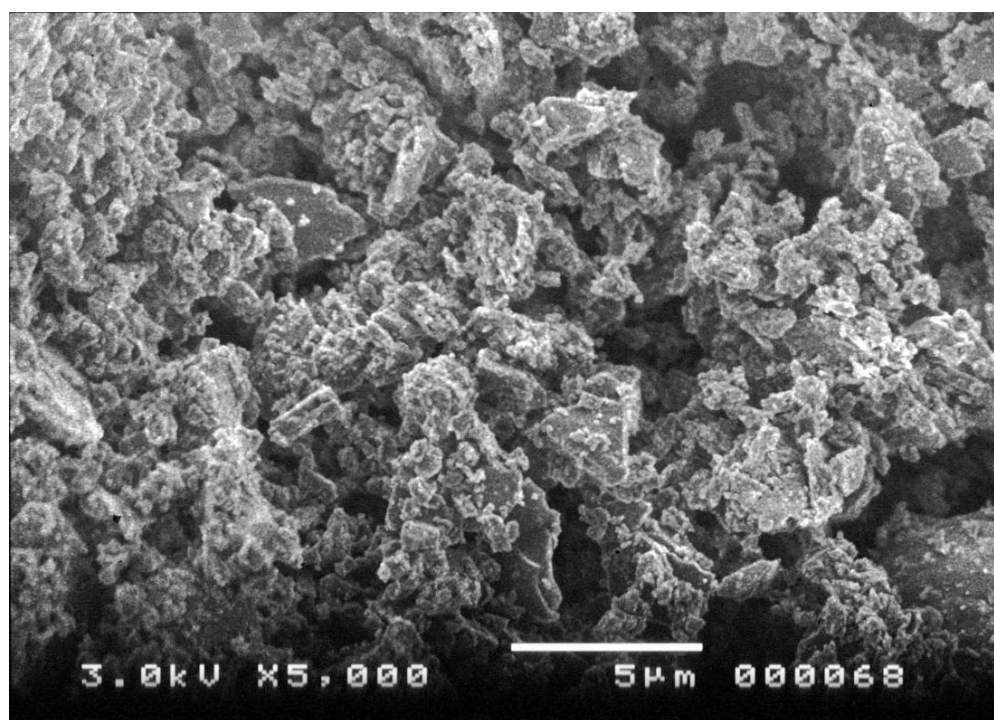


Figura 5.33 – Bloco estrutural (5000 X)

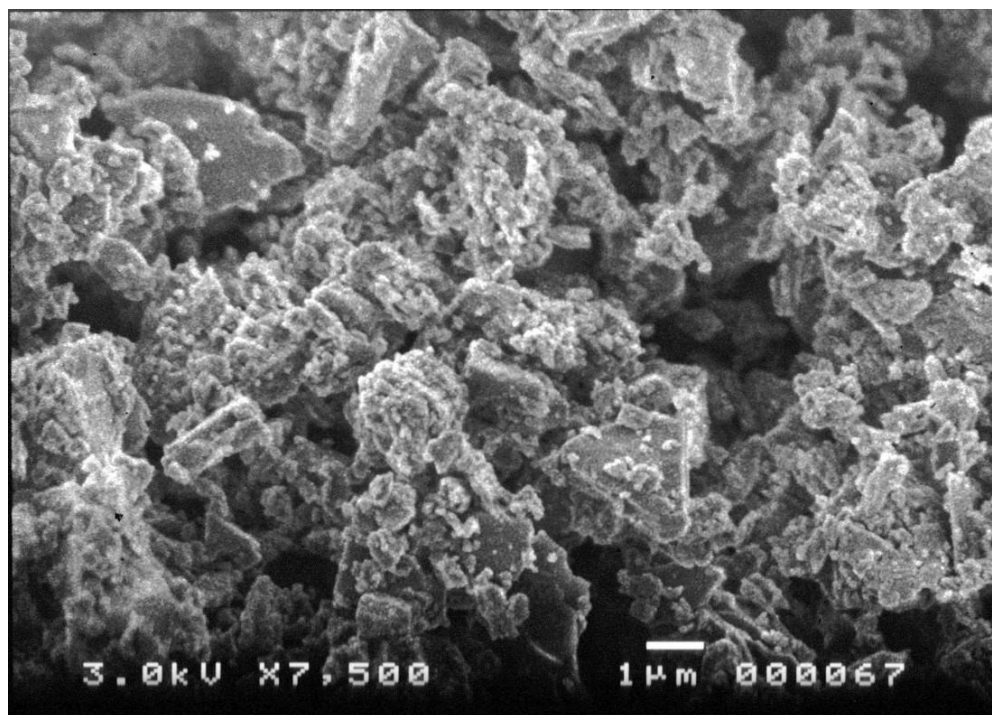


Figura 5.34 – Bloco estrutural (7500 X)

5.5.8 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992d), o índice de atividade pozolânica (IAP) com o cimento Portland é uma das exigências físicas para a classificação de um material como sendo pozolânico.

A metodologia para a determinação do IAP com cimento Portland é dada pela NBR 5752 (ABNT, 1992b). O método tem como objetivo comparar a resistência de duas argamassas com dosagem e consistência padronizadas. A argamassa de controle, chamada de “A”, é preparada com areia normal, de acordo com a NBR 7214 (ABNT, 1982), usando-se como aglomerante apenas o cimento Portland, no traço de 1:3 (em massa). Para o preparo da segunda argamassa (argamassa “B”), o volume absoluto do cimento Portland deve ser substituído em 35% pelo material pozolânico.

A quantidade de água necessária para cada argamassa é dada pelo índice de consistência, que deve ser de (225 ± 5) mm, determinado de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996).

De acordo com a norma, é recomendada a moldagem de três corpos-de-prova cilíndricos de 50 x 100 mm, que seguem para cura em câmara úmida durante (24 ± 2) horas, à temperatura de (23 ± 2) °C. Após este prazo, são retirados das formas e transferidos para recipientes hermeticamente fechados, sendo submetidos à cura durante mais 27 dias, com temperatura de (38 ± 2) °C.

A determinação da resistência à compressão dos corpos-de-prova e seus resultados seguem as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1996).

O tipo de cimento Portland utilizado no preparo das argamassas foi o CP V - ARI, que, segundo a NBR 5733 – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ABNT, 1991b), deve possuir de 95 a 100% de clínquer e sulfatos de cálcio (componentes em massa), sendo permitido até 5% de adição de material carbonático (mínimo de 85% de CaCO_3). Algumas das características do cimento utilizado são apresentadas na tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Cimento Portland CP V – ARI

Finura	Resíduo na peneira 75 μm (%)	0,2
	Resíduo na peneira 45 μm (%)	3
	Área Específica (cm^2/g)	4671
	Blaine (cm^2/g)	4500
Tempo de início de pega (h)		02:07
Expansibilidade a quente (mm)		<2
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	26
	3 dias	41
	7 dias	46
	28 dias	54,2

A moldagem dos corpos-de-prova e realização do ensaio de índice de consistência foram realizados no Laboratório de Concreto do DEMC (Departamento de Engenharia de Materiais e Construção).

O índice de atividade pozzolânica é obtido por:

$$(f_{cB}/f_{cA}) \times 100 (\%)$$

Onde:

- f_{cB} = resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento e material pozzolânico (argamassa B);
- f_{cA} = resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados só com cimento (argamassa A).

A água requerida é dada por:

$$(B/A) \times 100 (\%)$$

Onde:

- A e B = quantidades de água necessárias para a obtenção de índices de consistência normais de (225 ± 5) mm para as argamassas A e B, respectivamente.

Os valores obtidos para o índice de consistência estão representados na tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Índice de consistência

AMOSTRA	RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (mm)
Referência	0,52	230
Bloco de Vedação	0,54	230
Bloco Estrutural	0,54	230

O ensaio de resistência à compressão foi realizado do Laboratório de Materiais Metálicos do DEMC. A tabela 5.16 apresenta o resultado dos ensaios.

Tabela 5.16 – Índice de pozolanicidade

AMOSTRA	ÁGUA REQUERIDA (%)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	IAP (%)
Referência	---	49,7	---
Bloco de Vedação	100,2	39,1	78,7
Bloco Estrutural	100,3	39,5	79,5

O valor do IAP das duas amostras é superior ao determinado pela NBR 12653 (1992d), que é de 75%, assim como os valores de água requerida, que estão abaixo de 110%.

5.5.9 Índice de Atividade Pozolânica em Cimento Portland Pozolânico

A NBR 5753 (ABNT, 1992c) visa à obtenção do índice de atividade pozolânica em cimentos Portland pozolânicos, por meio de um método químico, que busca determinar o consumo de hidróxido de cálcio da amostra.

A pozolanicidade é obtida pela comparação da quantidade de Ca(OH)_2 presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado e a quantidade de Ca(OH)_2 que poderia saturar um meio da mesma alcalinidade.

O ensaio foi realizado nos Laboratórios de Química da ABCP. O resultado é expresso por uma isoterma de solubilidade do Ca(OH)_2 , à temperatura de 40 °C, na presença de uma solução alcalina.

As amostras enviadas para ensaio foram compostas por 65% de cimento Portland CP V - ARI e 35% de material pozolânico, misturados. O percentual da pozolana (35%) foi escolhido de acordo com o valor prescrito pela NBR 5752 (ABNT, 1992b), possibilitando a

comparação dos resultados entre este método e o anterior (item 4.5.9).

As figuras 35 e 36 apresentam os resultados dos ensaios.

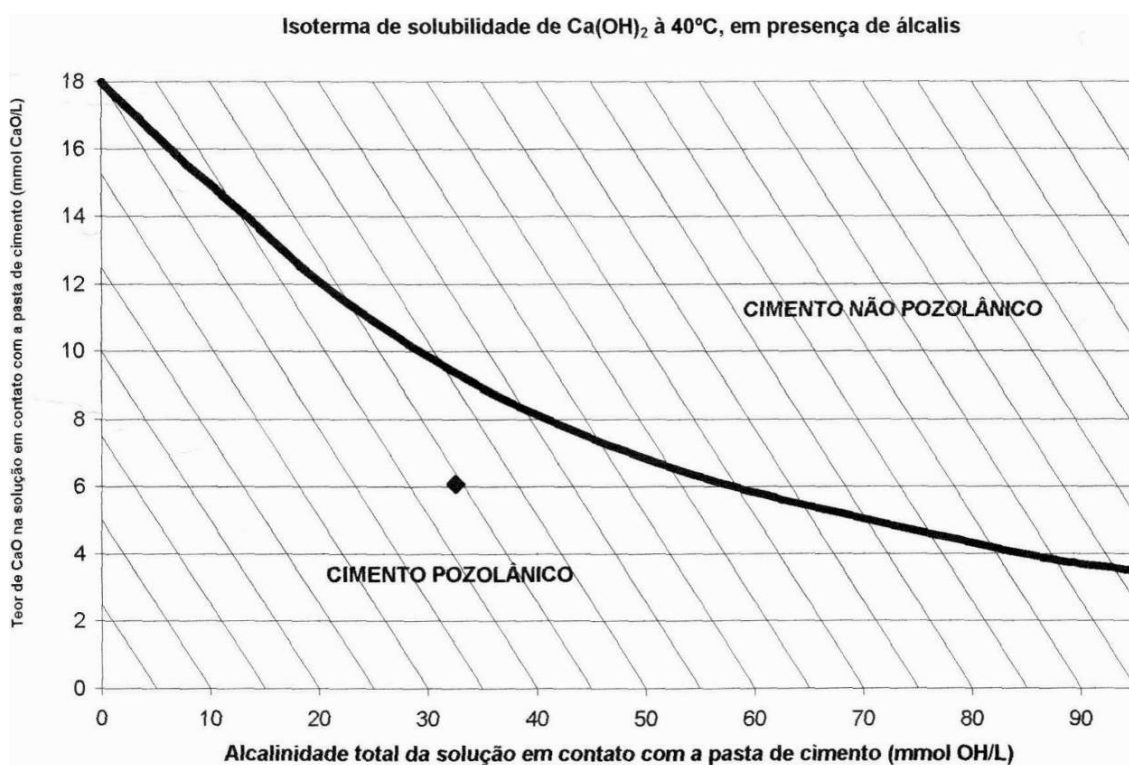


Figura 5.35 – Amostra de bloco de vedação

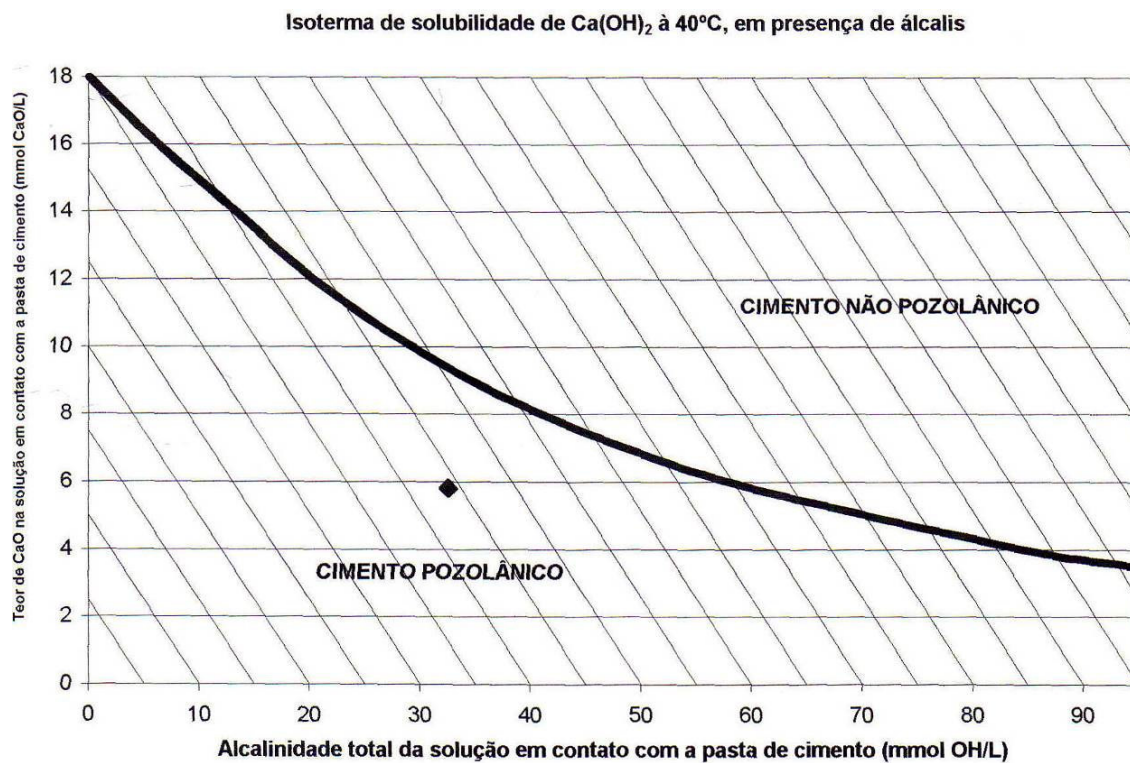


Figura 5.36 - Amostra de bloco estrutural

Ambas as amostras foram consideradas como cimento Portland pozolânico, corroborando com os resultados obtidos nos ensaios do item 4.5.9.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Poucos trabalhos na área fazem referências ao beneficiamento (moagem) do material estudado, apresentando somente resultados de caracterização e aplicação.

Os três métodos utilizados para a caracterização granulométrica (peneiramento à úmido, Cyclosizer Warman e granulômetro a laser) possuem acuidades diferenciadas, não havendo uma comparação direta entre eles. Contudo, embora diferentes entre si, todos os resultados mostraram-se adequados aos exigidos pela ABNT para caracterização granulométrica do material pozolânico (% retido na peneira $45\ \mu\text{m} < 34\%$).

Métodos para caracterização granulométrica como o peneiramento à úmido e o Cyclosizer Warman permitem a inspeção visual e análise dos grãos retidos por faixa, fato que não ocorre no granulômetro a laser.

A amostra de bloco de vedação apresentou uma área superficial específica cerca de 100% maior que o resultado da amostra do bloco estrutural ($8,46\ \text{m}^2/\text{g}$ contra $4,26\ \text{m}^2/\text{g}$). Em ambos os casos, são valores superiores aos do cimento Portland, que normalmente variam entre $0,35$ e $0,60\ \text{m}^2/\text{g}$, mas abaixo dos valores médios obtidos com o metacaulim (cerca de $20\ \text{m}^2/\text{g}$).

A análise química obtida pelo EDS mostrou a predominância de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . O somatório destas frações foi de 94,86% e 92,32%, para as amostras de bloco de vedação e estrutural, sendo superiores às exigências químicas para a classificação de uma amostra como sendo pozolânica, que, segundo a NBR 12653 (1992d), é de 75%.

Os resultados dos índices de atividade pozolânica com cimento Portland atingiram 78,7 e 79,5%, respectivamente para as amostras de bloco de vedação e estrutural. Estes valores são superiores ao exigido pela NBR 5752 (ABNT, 1992b), que é de 75%.

No ensaio para determinação do IAP em cimento Portland pozolânico, embora as amostras tenham sido preparadas com o teor máximo permitido (35% de adições pozolânicas), os resultados foram satisfatórios, classificando ambas as amostras como pozolânicas.

Os ensaios de caracterização das amostras demonstraram o potencial de ambos os materiais na utilização como adições pozolânicas em cimento Portland, argamassas e concretos.

Além de possíveis ganhos econômicos e ambientais, a utilização de adições pozolânicas está relacionada à durabilidade das estruturas, uma vez que as pozolanas consomem o Ca(OH)_2 e formam compostos do tipo do C-S-H, só que menos alcalinos, que auxiliam na diminuição da permeabilidade do material por meio do preenchimento de espaços capilares.

A quantidade de resíduos gerados pela indústria cerâmica estudada é relevante, chegando a 20 toneladas por dia.

O processo de fabricação de blocos de cerâmica vermelha não possui controle tecnológico rigoroso, contribuindo para o elevado índice de perdas. As indústrias deveriam investir na tecnologia de produção, principalmente na queima mais eficiente dos artefatos, economizando matéria-prima, combustível e energia, com conseqüente redução dos resíduos gerados.

A diminuição nas perdas teria efeitos benéficos maiores que a reciclagem do resíduo. Entretanto, a possibilidade do aproveitamento deste resíduo como adição pozolânica, transformando-o num produto, cria novas alternativas para a gestão ambiental das industriais cerâmicas, dando uma destinação mais nobre e adequada que a sua simples deposição em aterros sanitários.

As conclusões apresentadas referem-se apenas aos resultados obtidos, para os materiais específicos analisados neste trabalho, para as condições de ensaios adotadas, e para as técnicas de execução utilizadas. Sua representatividade deve ser confirmada por

meio de novas pesquisas, que apresentem resultados que possam complementá-la e confirmá-la.

7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para a caracterização completa dos resíduos estudados, visando sua utilização como adição pozolânica ao cimento Portland, argamassas e concretos, propõe-se a complementação da pesquisa com as seguintes sugestões:

Para os ensaios de caracterização, utilização de amostras do material com granulometria inferior a 45 μm (100% passante na peneira #325), visando determinar a influência da granulometria da reatividade do material;

Avaliação da influência dos teores de material pozolânico em substituição ao cimento Portland, variando-se os percentuais de substituição;

Análises termogravimétricas, com vistas ao possível beneficiamento térmico dos resíduos, visando à melhoria da atividade pozolânica dos mesmos;

Estudo sobre a durabilidade de artefatos confeccionados com estes materiais pozolânicos, contemplando pesquisas sobre as reações álcali-agregado, expansão e retração.

Avaliação dos processos produtivos envolvidos na confecção de produtos de cerâmica vermelha, visando a redução dos resíduos gerados;

Estudos sobre o balanço energético das atividades de beneficiamento (moagem, tratamento térmico, etc.) e a viabilidade econômica na utilização destes materiais em escala industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P. C. *Concreto de Alto Desempenho*. Tradução de Geraldo Serra. São Paulo: Pini, 2000.

ALBERTON, A. *Meio Ambiente e Desempenho Econômico-Financeiro: o Impacto da ISO 14001 nas Empresas Brasileiras*. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003. 307 p.

ALONSO, J. L., WESCHE, K. *Characterization of Fly Ash, Fly Ash in Concrete: Properties and Performance*. Report of Technical Committee 67-FAB – use of fly ash in building, RILEM, K. Wesche ed. , E&FN SPON, pp. 3-23;1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. *Cerâmica no Brasil – Números do Setor*. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br>>. Acessado em: 21 de Outubro de 2007a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. *Cerâmica no Brasil*. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/asp/abc_21.asp>. Acessado em: 21 de Outubro de 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. *Informações Técnicas – Processos de Fabricação – Formação de Peças*. Disponível em: <http://www.abceram.org.br/asp/abc_58.asp>. Acessado em: 14 de Setembro de 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Guia Básico de Utilização do Cimento Portland*. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5732: Cimento Portland Comum*. Rio de Janeiro, 1991a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5733: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial*. Rio de Janeiro, 1991b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5735: Cimento Portland de Alto-Forno*. Rio de Janeiro, 1991c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5736: Cimento Portland Pozolânico*. Rio de Janeiro, 1991d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5751: Materiais Pozolânicos – Determinação de Atividade Pozolânica - Índice de Atividade Pozolânica com Cal*. Rio de Janeiro, 1992a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5752: Materiais Pozolânicos - Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento Portland - Índice de Atividade Pozolânica com Cimento*. Rio de Janeiro, 1992b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5753: Cimento Portland Pozolânico - Determinação da Pozolanicidade*. Rio de Janeiro, 1992c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6502: Rochas e Solos*. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7214: Areia Normal para Ensaio de Cimento*. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão*. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11578: Cimento Portland Composto*. Rio de Janeiro, 1991e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12653: Materiais Pozolânicos*. Rio de Janeiro, 1992d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13956: Sílica Ativa Para Uso em Cimento Portland, Concreto, Argamassa e Pasta de Cimento Portland - Especificação*. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. *Informações Gerais*. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br/>>. Acessado em: 20 de Setembro de 2006.

BATTAGIN, A. F. *Uma breve História do Cimento Portland. Associação Brasileira do Cimento Portland*. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/basico_sobre_cimento/historia.shtml>. Acessado em: 11 de dezembro de 2007.

BERRY, E. E., MALHORTA, V. M. *Fly Ash in Concrete*. In MALHORTA, V. M. (Coord.), *Supplementary Cementing Materials for Concrete*. Canada: Minister of Supply and Services Canada, 1987. v.1, p. 36-163.

BOUMANS, P., KLOCKENKÄMPER, R. *Total Reflection X-Ray Fluorescence Spectrometry*. Second Workshop on TXRF, Dortmund. 26 e 27 de maio, 1988. *Spectrochim. Acta*, 44B: 433, 1989.

BRANDÃO, P. R. G. *Métodos de Instrumentação e Análise*. Notas de Aula, Belo Horizonte: Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. *Resolução n.º 264, de 26 de agosto de 1999*. Diário Oficial da União. Brasília, DF. 20 de março de 2000.

CAMÕES, AIRES F. F. L., *Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes*. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade do Minho. Minho: Portugal, 2002.

CIMENTO POZOSUL. *Fly Ash M-100*. Disponível em: <<http://www.cimentopozosul.com.br/main/default.php?pg=M3b0VHZvJHU&id=gM>> Acessado em: 20 de novembro de 2006.

CIMENTO.ORG. *Cimento no Mundo*. Disponível em: <<http://www.cimento.org/>> Acessado em: 11 de janeiro de 2007.

CLUB OF ROME. *The Club of Rome*. Disponível em: www.clubofrome.org Acessado em: 17 de julho de 2007.

CORDEIRO, G. C., VAILLANT, J. M., DÉsir, J. M. *Resíduo Cerâmico como Aditivo Mineral em Concreto*. IV Seminário “Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações”. Comitê Técnico 206/Instituto Brasileiro do Concreto, pp. 291 – 301. São Paulo, 2001.

CST. *Catálogo de Produtos: Lama de Alto-Forno*. Disponível em: <http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/lama/cst_lama.asp>. Acessado em: Dezembro de 2007.

CST. *Escória de Alto-Forno*. Disponível em: <http://www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/cst_forno.asp>. Acessado em: 21 de Outubro de 2006.

DAL MOLIN, D. C. C. *Adições Minerais para Concreto Estrutural*. In IBRACON, *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização*. Vol. 1, Ed. G. C. Isaia. São Paulo, 2005. p. 345-378.

FAICK, J. N. *Geology and Technology of Some Natural Pozzolans in North Central California*. *Econ. Geol.* 58, 702. 1963.

FARIAS FILHO, J.; ROLIM, J. S.; TOLEDO FILHO, R. D. *Potencialidades da Metacaolinita e do Tijolo Queimado Moído como Substitutos Parciais do Cimento Portland*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, v.4, n.3, 2000.

FERREIRA, AURÉLIO B. DE H. *Novo Dicionário Eletrônico Aurélio*. Versão 5.11^a: Positivo Informática, 2004.

GUERRA, A. T., IBGE, CONSELHO NACIONAL DE GEOGRAFIA. *Dicionário Geológico-Geomorfológico*. 2. edição. Rio de Janeiro: IBGE, Conselho Nacional de Geografia, 1966. 411p

JOHN, W. M. *A Construção, O Meio Ambiente e a Reciclagem*. Disponível em: http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm Acessado em: 11 de janeiro de 2007.

KASSAUTZKI, L. *Phenolite as a Pozzolan in Cement*. *Cement Kalk Gips* 12:668-92, 1983.

LEA, F.M. *The Chemistry of Cement and Concrete*. 3rd. ed., New York, Dover Publishing, v.1, 375p, 1971.

LEINZ, V., MENDES, J. C. *Vocabulário Geológico: Com a Terminologia Correspondente em Inglês e Alemão*. 2. ed. São Paulo: Nacional, 1959. 180p.

LOCHER, F. W. *Research Inst. of German Cement Industry West Germany*; Personal Communication; Agosto de 1985.

LOPES, DIORGES C.. *Estudo Da Viabilidade de Adição de Resíduo de Pó de Fumo à Massa Cerâmica*. Dissertação de Mestrado em Construção Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. 94p. Rio Grande do Sul, 2005.

MALHORTA, V. M., *Supplementary Cementing Materials for Concrete*. Canada: Minister of Supply and Services Canada, 1987.

MASSAZA, F., COSTA, U. *Aspects of the Pozzolanic Activity and Properties of Pozzolanic Cements*. II Cemento 76:3-18, 1979.

MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J., BEHRENS III, W. W. *The Limits to Growth: A Report for The Club of Rome's Project on The Predicament of Mankind*. New York: Universe Books, 1972. 205 p.

MEHTA, P. K. *Natural Pozzolans*. In MALHORTA, V. M. (Coord.), *Supplementary Cementing Materials for Concrete*. Canadá: Minister of Supply and Services Canada, 1987. v.1, p. 1-33.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Studies on Blended Portland Cements Containing Santorin Earth*. Cement and Concret Research 11:507-518, 1981.

MIELENZ, R. C. *Mineral Admixtures – History and Background*. *Concrete International* 34-42, 1983.

MIELENZ, R. C. *Physical Properties of Some Typical Foundation Rocks*. Corrent Laboratory Report n.º SP-39. Denver, EUA, 1950.

MIELENZ, R. C., WHITTE, L. P., GLANTZ, O. J. *Effect of Calcination on Natural Pozzolans*. ASTM, Special Technical Publication 99:43-91, 1950.

MINEROPAR. *Glossário de Termos Geológicos*. Disponível em: <<http://www.pr.gov.br/mineropar/htm/glossario/v.html>> Acessado em: 12 de outubro de 2006.

MITCHELL, J.K., *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley and Sons, Inc, 1ª ed., New York, 1976, 437p.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). Documento Agenda 21 da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Disponível em: www.mma.gov.br. Acessado em: Dezembro de 2006.

MONTANHEIRO, T. J.; YAMAMOTO, J. K.; SANT'AGOSTINHO, L. M.; KIHARA, Y.; SAITO, M. M.. *Terras Diatomáceas: Uma Pozzolana Natural na Bacia do Paraná*, Estado de São Paulo. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, SP - 23(2): 1-17. 2002b.

MONTANHEIRO, T.J.; YAMAMOTO, J. K.; KIHARA, Y. *Característica e Propriedades Pozolânicas de Arenitos Opalinos da Serra de Itaqueri-SP*. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 23(1): 13-24. 2002a.

MONTENEGRO, L. C. M. *Laboratório de Tratamento de Minérios I – Cyclosizer*. Notas de Aula, Belo Horizonte: Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

NASCIMENTO FILHO, V. F. *Técnicas Analíticas Nucleares de Fluorescências de Raios X por Dispersão de Energia (ED-XRF) e por Reflexão Total (TXRF)*. Departamento de Ciências Exatas/ESALQ. Laboratório de Instrumentação Nuclear. CENA – Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP, 1999.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 2ª ed. São Paulo: Editora PINI, 1997.

NICOLAIDIS, N. *Santorin Earth – Na Active Admixture in Greek Portland Cements*. Proceeding, Thirtieth International Congresso of Industrial Chemistry. Atenas, 1957.

OLIVEIRA, JOSÉ R. *Apostila de Mecânica dos Solos – Módulo II (Complemento)*. Rio de Janeiro, 2004.

OSHIMOTO, E., THOMAZ, E. *Materiais Cerâmicos para Construção Civil*. São Paulo : USP, 1990. 102p.

PERONI, RODRIGO L. *Rochas Ígneas – Aula 4*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia de Minas - Geologia de Engenharia I. Porto Alegre, 2007.

PERUZZI, A. P., *Comportamento das Fibras de Vidros Convencionais em Matriz de Cimento Portland Modificada com Látex e Adição de Sílica Ativa*. São Carlos, 2002. 96p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PINTO, C. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. Oficina de Textos, São Paulo, 2000.

POO, RAMON, GRUPO CEMENTOS MEXICANOS. Personal Communication, abril de 1985. In MEHTA, P. K. *Natural Pozzolans*. In MALHORTA, V. M.(Coord.), *Supplementary Cementing Materials for Concrete*. Canadá: Minister of Supply and Services Canada, 1987. v.1, p. 1-33.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA) – *Perspectivas do Meio Ambiente Mundial - GEO 3*. Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais & Universidade Livre da Mata Atlântica, 2004.

RAMACHANDRAN, V. S., PAROLI, R. M., BEAUDOIN, J. J., DELGADO, A. H. *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*. Institute for Research in Construction & National Research Council of Canada. Norwich: Noyes Publications, 2002.

RÊGO. J.H.S, LIDUÁRIO, A.S., VIEIRA, F. L., ANDRADE, M. A. S. *Avaliação do Ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (I.A.P) com Cimento para Adições Minerais de Alta Reatividade*. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC . Anais. Bento Gonçalves, 2007.

SABOYA Jr., F., ALEXANDRE, J., TOLEDO, R.. *Aplicação do Planejamento em Rede Simplex para Análise de Matéria-Prima em Cerâmicas Vermelhas*; In.: 44 Congresso Brasileiro de, v. 3, n. 1, São Pedro, pp. 1 – 6, 2000.

SANTOS, H. M., VEIGA, F. J. B., PINA, E. M. S. T. et al. *Production of Pellets by Pharmaceutical Extrusion and Spheronisation. Part II: Physical Characterization of Pellets*. Rev. Bras. Cienc. Farm., Julho/Setembro. 2006, vol.42, no.3, p.309-318.

SANTOS, P. S.. *Ciência e Tecnologia de Argilas*, Vol. 1. 1ª Edição, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1975.

SANTOS, P. S.. *Ciência e Tecnologia de Argilas*, Vol. 2. 2ª Edição, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1992.

SCHWIETE, H. E., LUDWIG, U., WIGGER, K. M. *Constituents of Rheinisch and Bayerischer Trasses*. Forshungsber NRW n.º 956. 1961.

SILVA, N. I. WARPECHOWSKI DA, et al. *Caracterização de Cinzas Volantes para Aproveitamento Cerâmico*. São Paulo, v. 45, n. 296, 1999. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acessado em: 20 de Novembro de 2006.

SOUZA, G. P.; FILGUEIRA, M; ROSENTAL, R. e HOLANDA, J. N. F. *Characterization of Natural Diatomaceous Composite material*. São Paulo, v. 49, n. 309, 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acessado em: 14 de Novembro de 2007.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C.. *Estudo da Viabilidade do Uso de Argilas Calcinadas, Como Metacaulim de Alta Reatividade (MCAR)* Revista Engenharia Civil n.º 15. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal. 2002.

SUGUIO, K. *Dicionário de Geologia Sedimentar e Áreas Afins*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 1217p.

TOVEY, N. K. *A Selection of Scanning Electron Micrographs of Clays*. CUED/C-SOILS/TR5a, University of Cambridge, Department of Engineering, 1971.

UNITED NATIONS. *Agenda 21*. Division for Sustainable Development. Department of Economic and Social Affairs. Disponível em: <http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/index.htm>. Acessado em: Novembro de 2006.

VAN VLACK, L. H. *Propriedades dos Materiais Cerâmicos: Ciência e Tecnologia de Argilas*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1993.

VELTEN, RODRIGO ZORZAL. *Caracterização Mecânica de Misturas Solo-Escória de Alto-Forno Granulada Moída para Aplicações em Estradas Florestais*. Revista Árvore. v. 30, n. 2, Viçosa, 2006.

VIEIRA, ANDRESSA DE ARAÚJO PORTO. *Estudo do Aproveitamento de Resíduos de Cerâmica Vermelha como Substituição Pozolânica em Argamassas e Concretos*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2005. 127p.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F. de; PINATTI, D. G.. *Characterization of Red Ceramic Body Used in The Production of Bricks in The Region of Campos dos Goytacazes - RJ*. São Paulo, v. 46, n. 297, 2000. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 12 Mar 2007.

VIEIRA, C. M. F.; MARTINS, C. A. C.; MOTHÉ, A. V., SANCHÉZ, R., MONTEIRO, S. N. *Incorporação de Lama de Alto-Forno em Cerâmica Vermelha*. In: 49º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Anais. Salvador, 2007.

WIKIPÉDIA. *Pantheon Romano*. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Pantheon>> Acessado em: 12 de outubro de 2006.

ZAMPIERI, V. A. *Determinação da Atividade Pozolânica: Avaliação Crítica e Proposição de Uma Metodologia Alternativa*. In: 3º Congresso Brasileiro do Cimento. Anais. Vol.1. 1994.

ANEXOS

Anexo A – Resultado dos Ensaios de Área Superficial Específica

Amostra 01 – Bloco de Vedação

Date: 12/04/2007

Page 1

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.24

Sample ID	AMOSTRA 01 (VEDACAO)				
Description	IGOR				
Comments					
Sample Weight	0.3791 g				
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Temp	40.0 °C	Operator	PAULO
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	429.4 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	1	End of Run	11/13/2007 06:55
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	IGOR1.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.35	PC SW Version	1.24

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	8.460E+00	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	1.435E+01	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	8.130E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	9.158E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	8.172E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	9.209E+00	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	7.640E+00	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	8.201E-01	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.199E+01	m ² /g

PORE VOLUME DATA

BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.479E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.482E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.479E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.482E-01	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.431E-01	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.435E-01	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	4.293E-04	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	4.260E-03	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	3.527E-03	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	3.604E-03	cc/g

PORE SIZE DATA

BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	3.031E+02	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	3.096E+02	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	3.031E+02	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	3.096E+02	Å
DR Method Micro Pore Width	1.077E+02	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.760E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.488E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.796E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : ON
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm
Last Po Acquired 705.37 mm Hg
Additional Initialization Information Not Recorded.

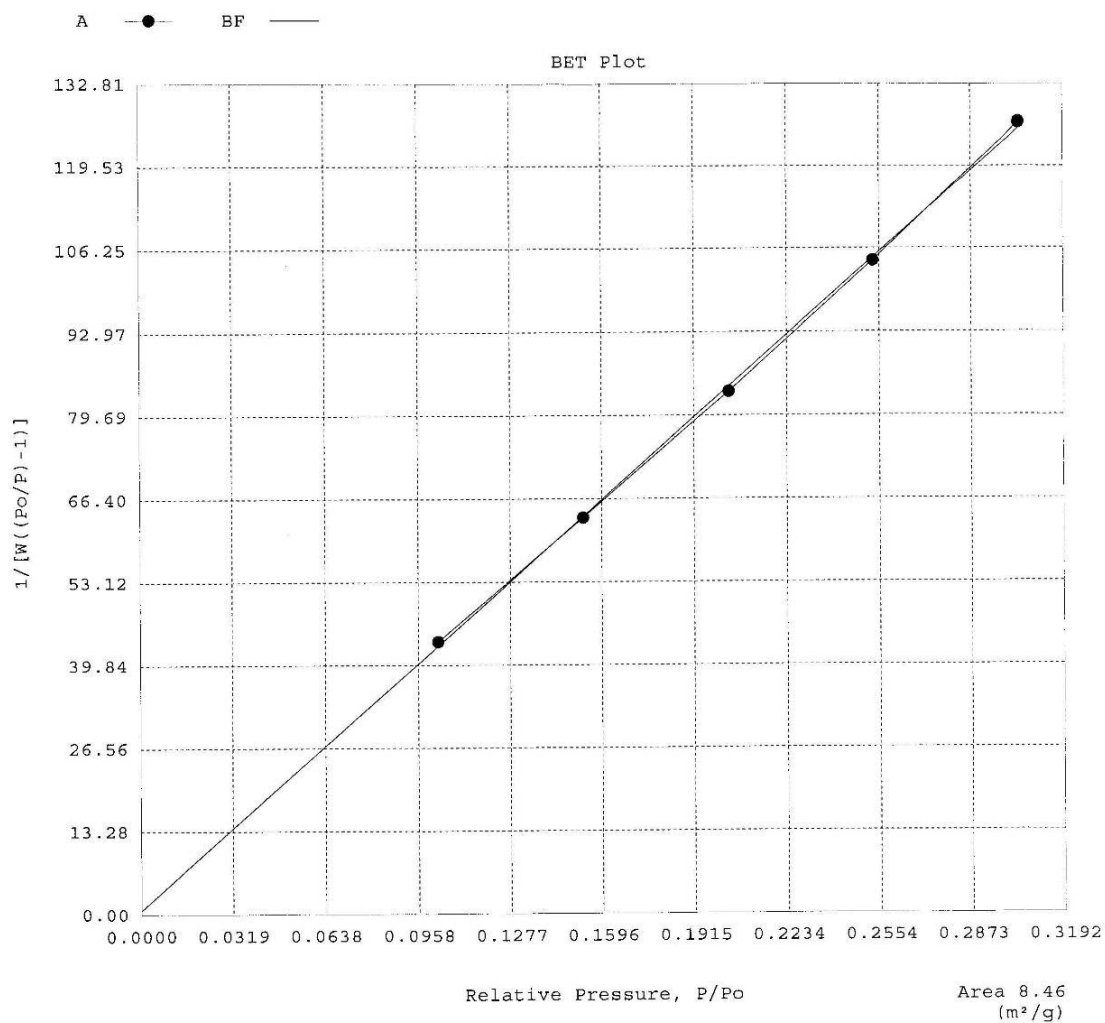
BJH/DH Moving Average Size : 1

Interaction Constant (K) 2.9600 nm³ x kJ/mol

Date: 12/04/2007

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.24

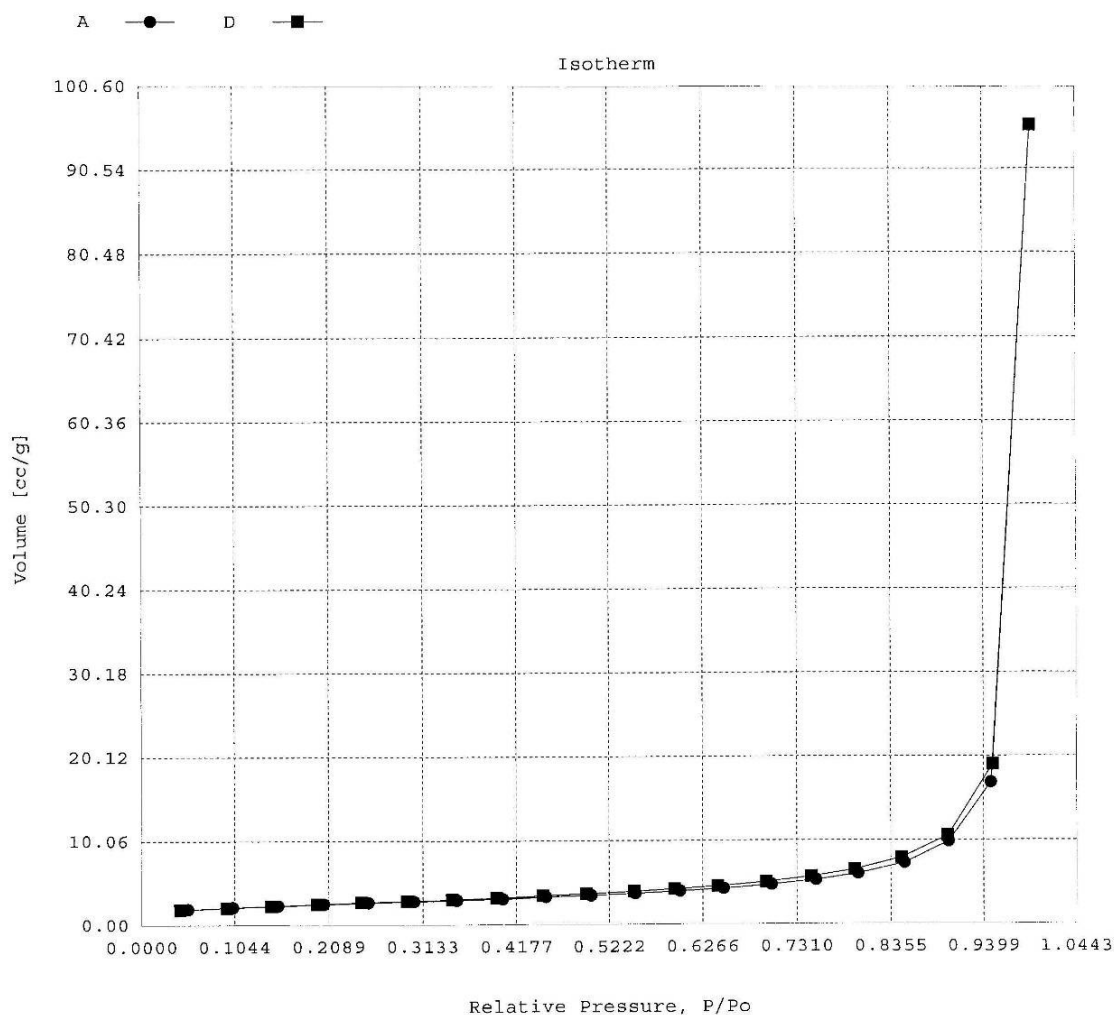
Sample ID	AMOSTRA 01 (VEDACAO)				
Description	IGOR				
Comments					
Sample Weight	0.3791 g	Outgas Temp	40.0 °C	Operator	PAULO
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	429.4 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	1	End of Run	11/13/2007 06:55
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	IGOR1.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35	PC SW Version	1.24
Station #	1				



Date: 12/04/2007

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.24

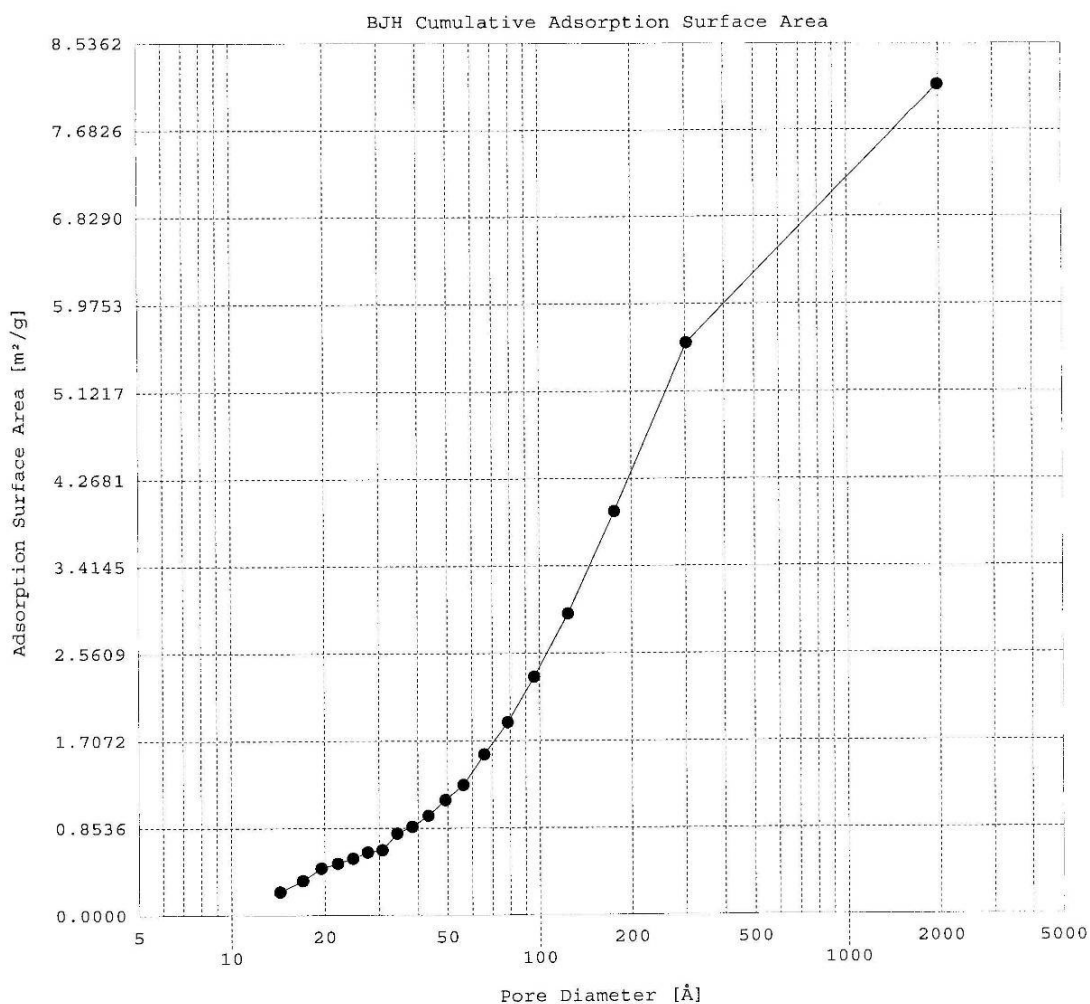
Sample ID	AMOSTRA 01 (VEDACAO)				
Description	IGOR				
Comments					
Sample Weight	0.3791 g	Outgas Temp	40.0 °C	Operator	PAULO
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	429.4 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	1	End of Run	11/13/2007 06:55
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	IGOR1.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35	PC SW Version	1.24
Station #	1				



Date: 12/04/2007

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.24

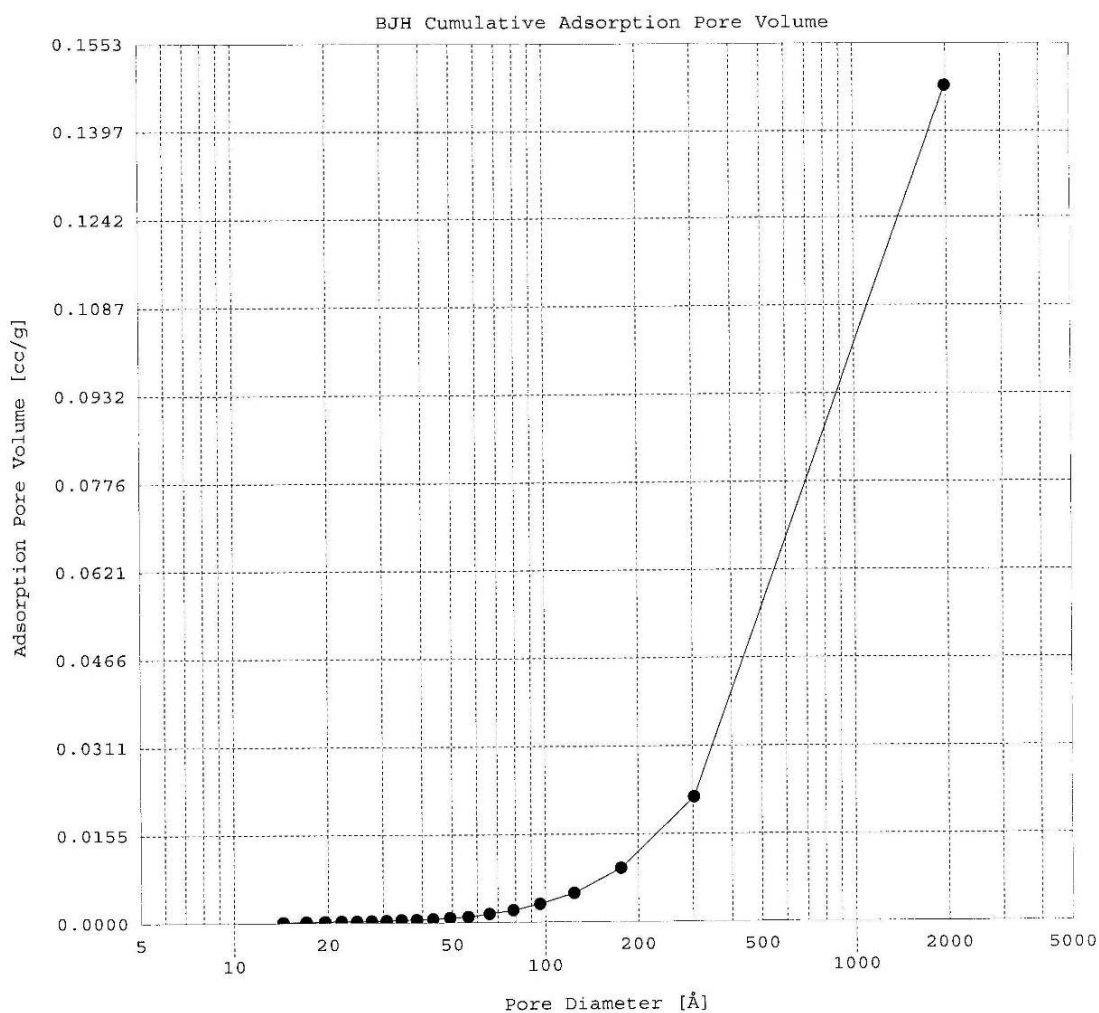
Sample ID	AMOSTRA 01 (VEDACAO)				
Description	IGOR				
Comments					
Sample Weight	0.3791 g	Outgas Temp	40.0 °C	Operator	PAULO
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	429.4 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	1	End of Run	11/13/2007 06:55
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	IGOR1.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35	PC SW Version	1.24
Station #	1				



Date: 12/04/2007

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.24

Sample ID	AMOSTRA 01 (VEDACAO)				
Description	IGOR				
Comments					
Sample Weight	0.3791 g	Outgas Temp	40.0 °C	Operator	PAULO
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	429.4 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	1	End of Run	11/13/2007 06:55
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	IGOR1.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35	PC SW Version	1.24
Station #	1				



Amostra 02 – Bloco Estrutural

Date: 12/06/2007

Page 1

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.24

Sample ID	AMOSTRA 02				
Description	IGOR				
Comments					
Sample Weight	0.3693 g	Outgas Temp	40.0 °C	Operator	PAULO
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	564.2 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	1	End of Run	11/15/2007 07:54
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS7B1402.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35	PC SW Version	1.24
Station #	1				

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	4.260E+00	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	7.352E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	4.224E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	5.248E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	4.289E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	5.294E+00	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	4.137E+00	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	1.231E-01	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	5.990E+00	m ² /g

PORE VOLUME DATA

BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.188E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.188E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.188E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.188E-01	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.149E-01	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.150E-01	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	4.979E-05	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	2.129E-03	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	1.730E-03	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	1.773E-03	cc/g

PORE SIZE DATA

BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	1.845E+03	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.856E+03	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	1.845E+03	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.856E+03	Å
DR Method Micro Pore Width	1.135E+02	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.780E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.548E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.916E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : ON
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm
Last Po Acquired 713.74 mm Hg
Additional Initialization Information Not Recorded.

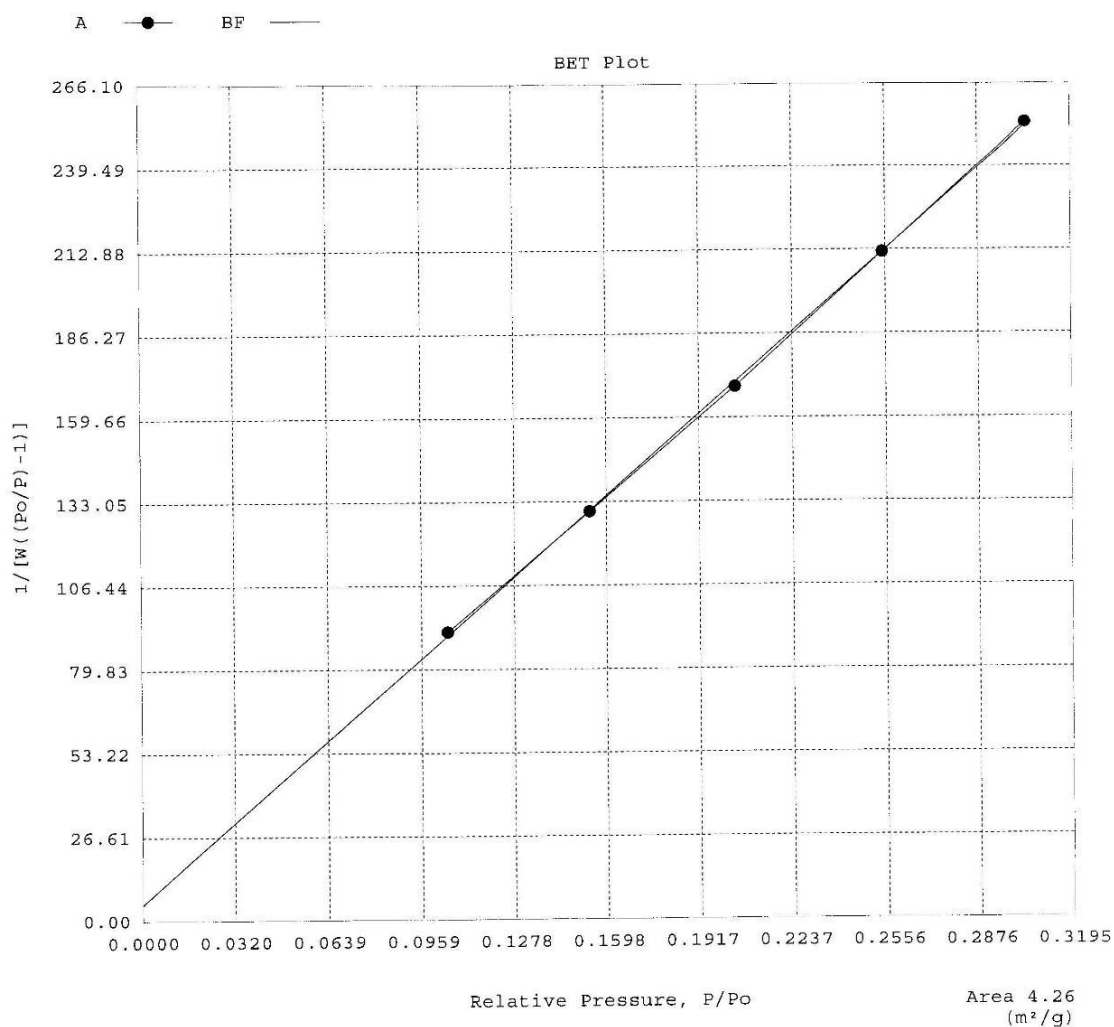
BJH/DH Moving Average Size : 1

Interaction Constant (K) 2.9600 nm³ x kJ/mol

Date: 12/06/2007

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.24

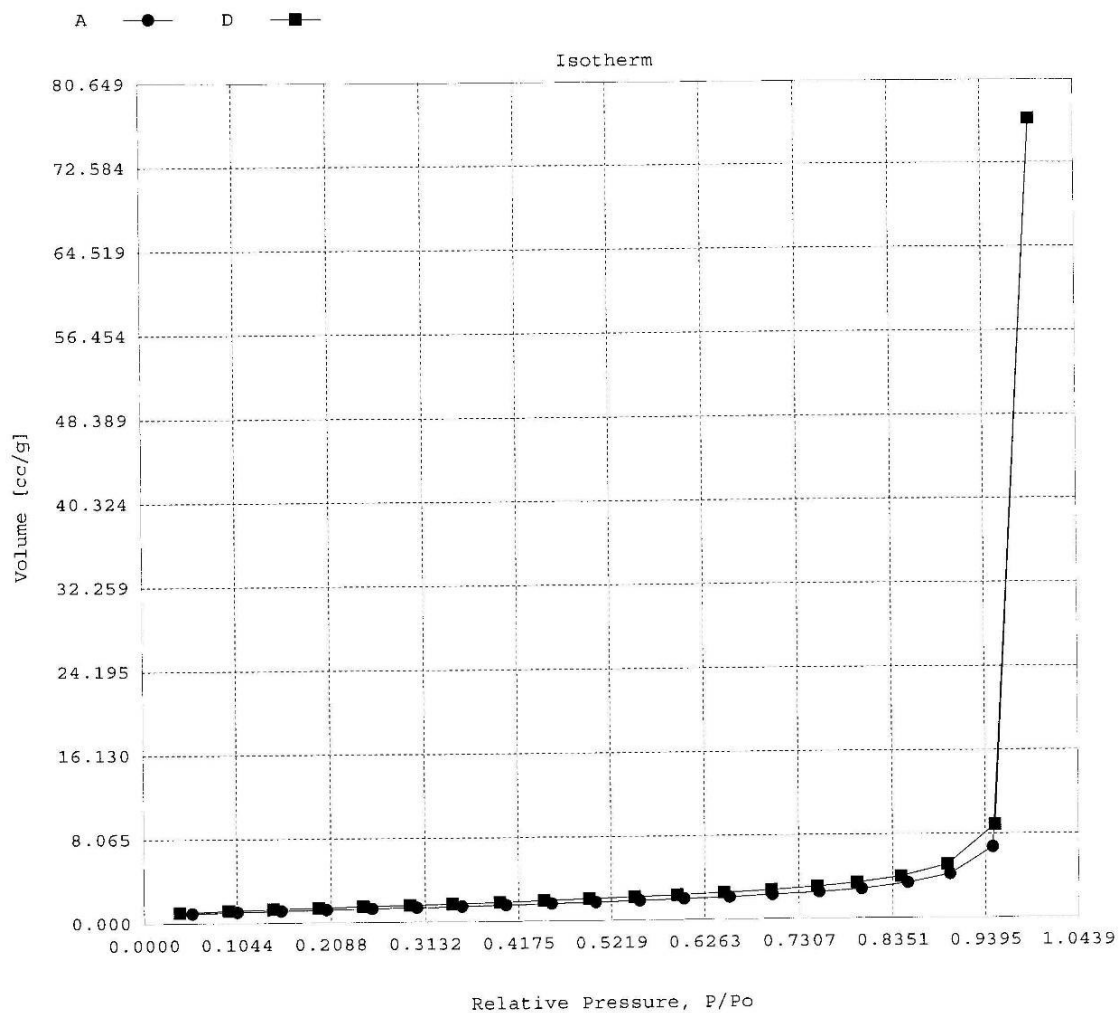
Sample ID	AMOSTRA 02				
Description	IGOR				
Comments					
Sample Weight	0.3693 g	Outgas Temp	40.0 °C	Operator	PAULO
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	564.2 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	1	End of Run	11/15/2007 07:54
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS7B1402.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35	PC SW Version	1.24
Station #	1				



Date: 12/06/2007

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.24

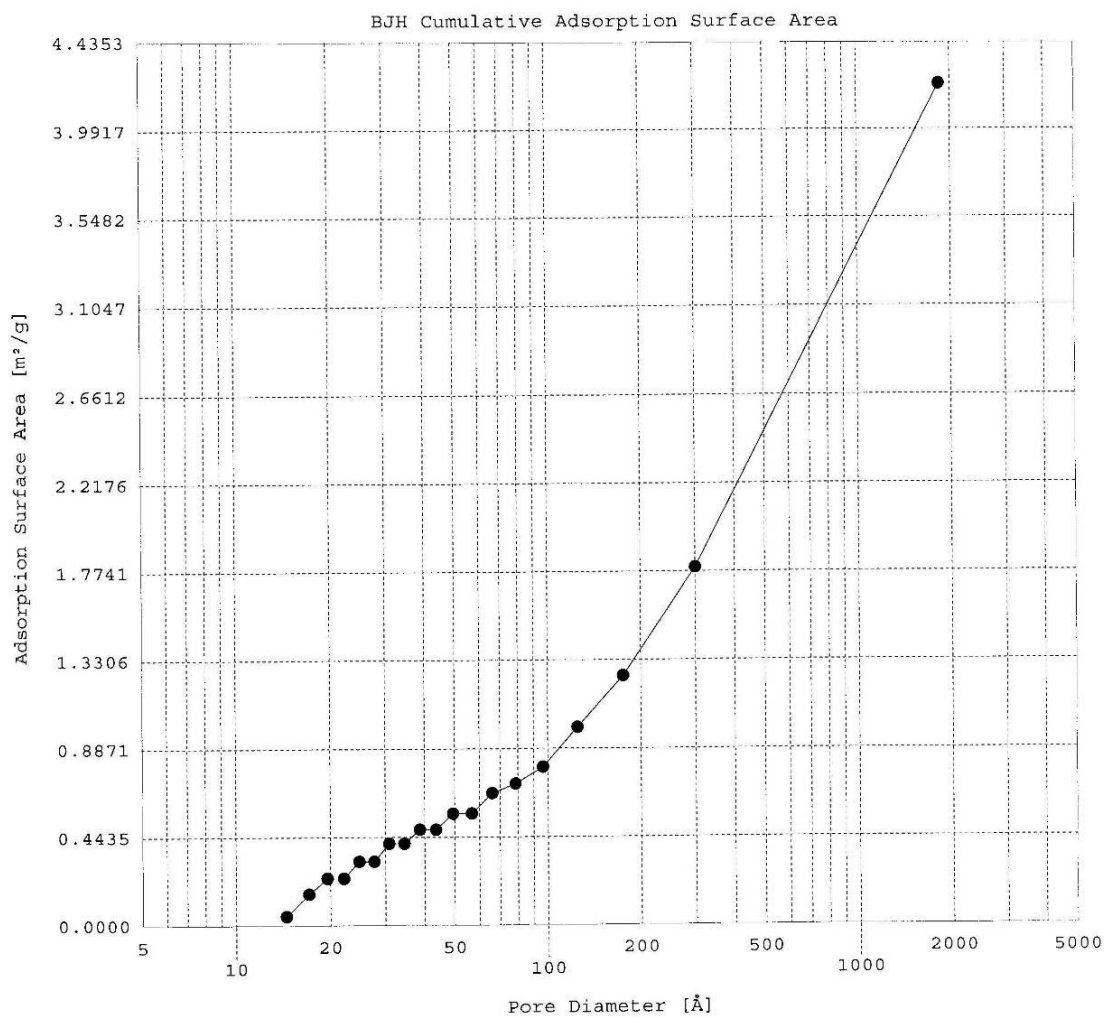
Sample ID	AMOSTRA 021-00000000				
Description	IGOR				
Comments					
Sample Weight	0.3693 g	Outgas Temp	40.0 °C	Operator	PAULO
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	564.2 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	1	End of Run	11/15/2007 07:54
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS7B1402.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35	PC SW Version	1.24
Station #	1				



Date: 12/06/2007

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.24

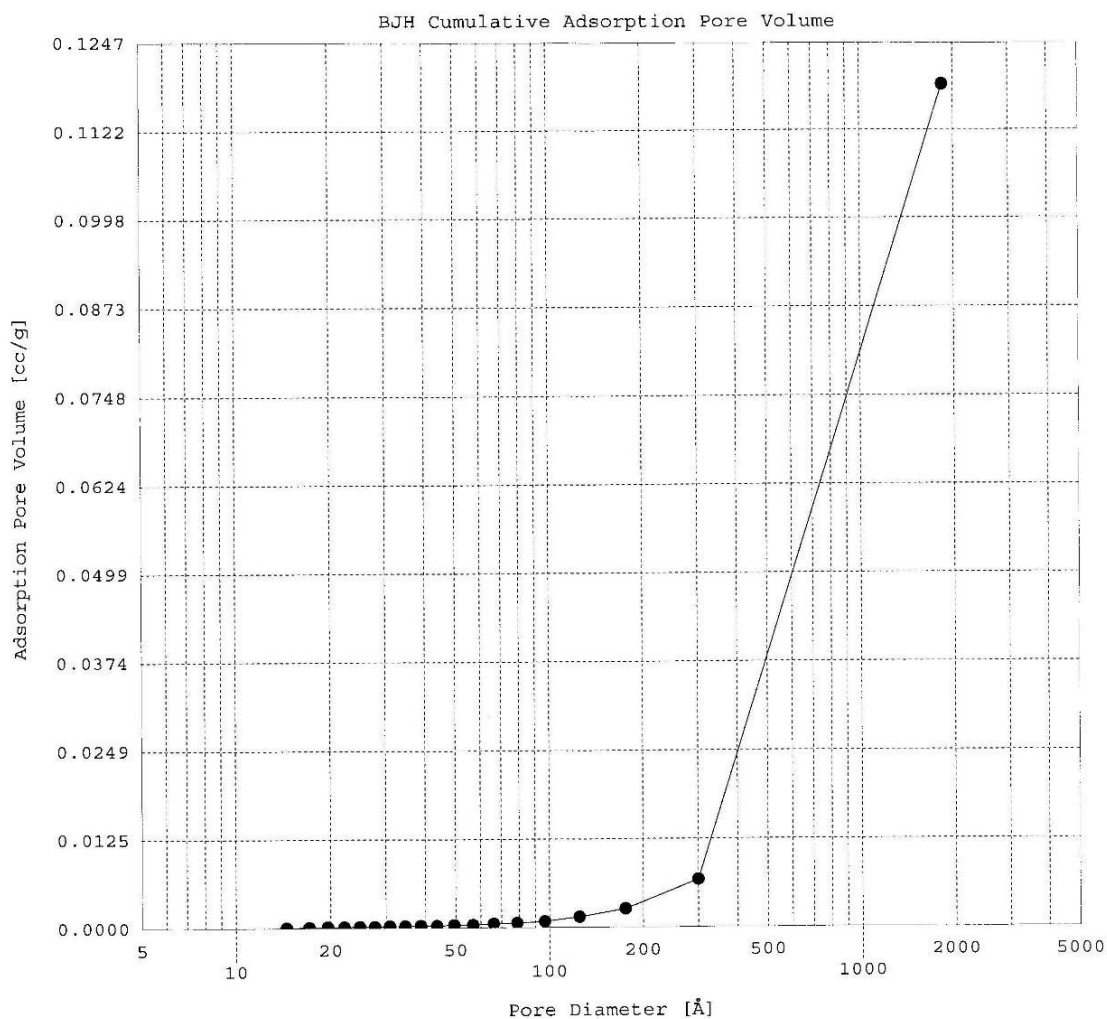
Sample ID	AMOSTRA 02				
Description	IGOR				
Comments					
Sample Weight	0.3693 g	Outgas Temp	40.0 °C	Operator	PAULO
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	564.2 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	1	End of Run	11/15/2007 07:54
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS7B1402.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35	PC SW Version	1.24
Station #	1				



Date: 12/06/2007

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.24

Sample ID	AMOSTRA 02 ----				
Description	IGOR				
Comments					
Sample Weight	0.3693 g	Outgas Temp	40.0 °C	Operator	PAULO
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	3.0 hrs	Analysis Time	564.2 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	1	End of Run	11/15/2007 07:54
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS7B1402.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35	PC SW Version	1.24
Station #	1				



Anexo B – Resultado dos Ensaios de Densidade

Análise de densidade por Picnômetro a Gás

Id. da Amostra:	Bloco de Vedação		
Amostra:	HM64/07	VA (cm ³):	82,528
Operador(a):	Ângela/Ilda	VC (cm ³):	154,568
Data:	19/4/2007	Volume (cm ³):	30,947
Massa (g):	86,91	Densidade média (g/cm ³):	2,81
Gás:	He		

DADOS COLETADOS

Parâmetros					
Medida	P2	P3	VP (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Média harmônica
1	17,323	10,389	30,919	2,811	2,80838979
2	17,323	10,387	30,978	2,806	
3	17,326	10,39	30,943	2,809	
4			0	0	
5			0	0	
6			0	0	
7			0	0	
8			0	0	
9			0	0	
10			0	0	
11			0	0	
Média	17,324	10,389	30,947	2,808	

$$VP = VC + \frac{VA}{1 - \frac{P3}{P2}}$$

$$\text{Densidade} = \frac{m}{VP}$$

VC = Volume da célula (cm³)
 VP = Volume da Amostra (cm³)
 VA = Volume adicionado (cm³)
 m = Massa da Amostra (g)
 P2= Leitura da pressão da célula em VA OUT
 P3 = Leitura da pressão da célula em VA IN
☐ Dados colhidos da amostra

Análise de densidade por Picnômetro a Gás

Id. da Amostra:	Bloco Estrutural	VA (cm ³):	82,528
Amostra:	HM65/07	VC (cm ³):	154,568
Operador(a):	Ângela/Ilda	Volume (cm ³):	34,522
Data:	19/4/2007	Densidade média (g/cm ³):	2,82
Massa (g):	97,49		
Gás:	He		

DADOS COLETADOS

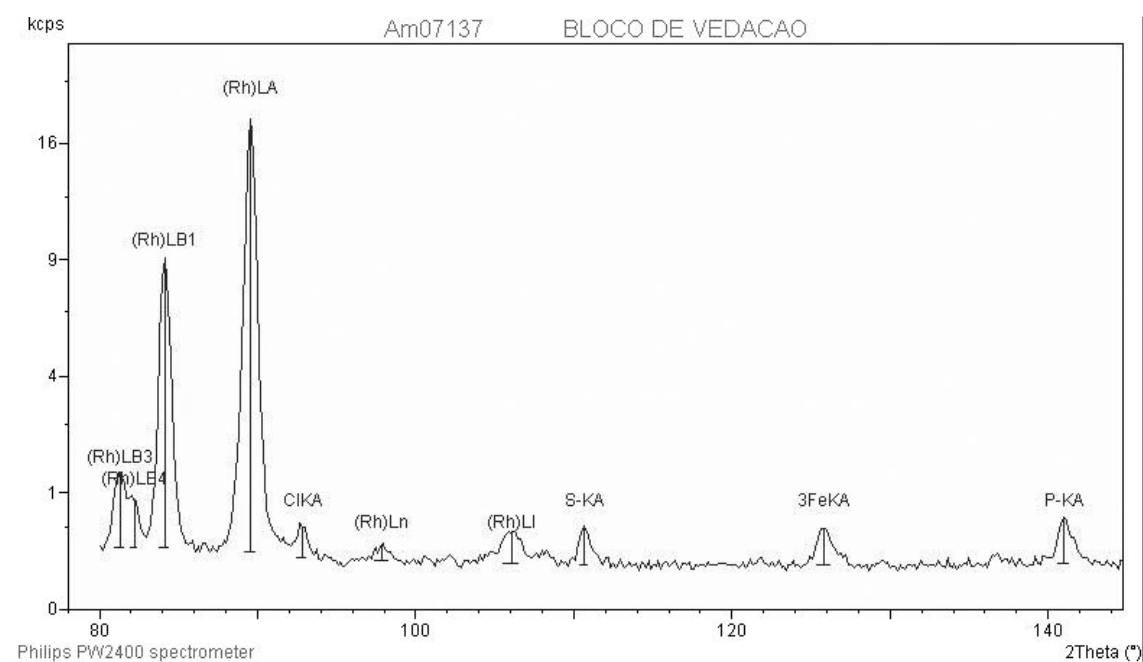
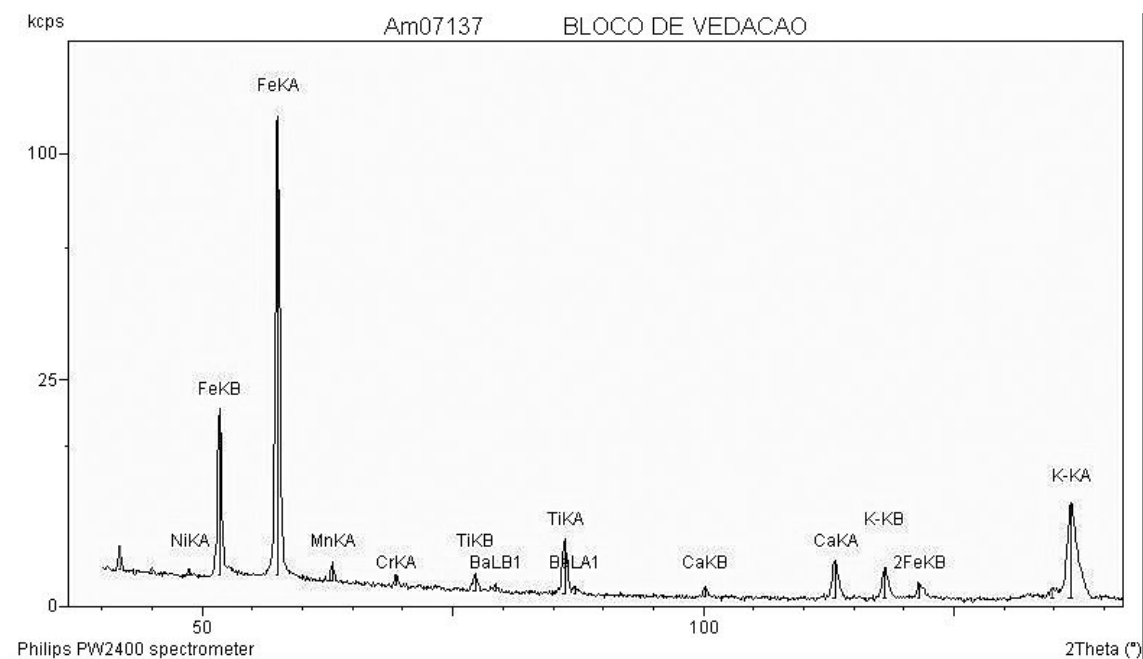
Parâmetros					
Medida	P2	P3	VP (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Média harmônica
1	17,339	10,277	34,469	2,828	2,82402889
2	17,331	10,271	34,505	2,825	
3	17,331	10,268	34,591	2,818	
4			0	0	
5			0	0	
6			0	0	
7			0	0	
8			0	0	
9			0	0	
10			0	0	
11			0	0	
Média	17,334	10,272	34,522	2,824	

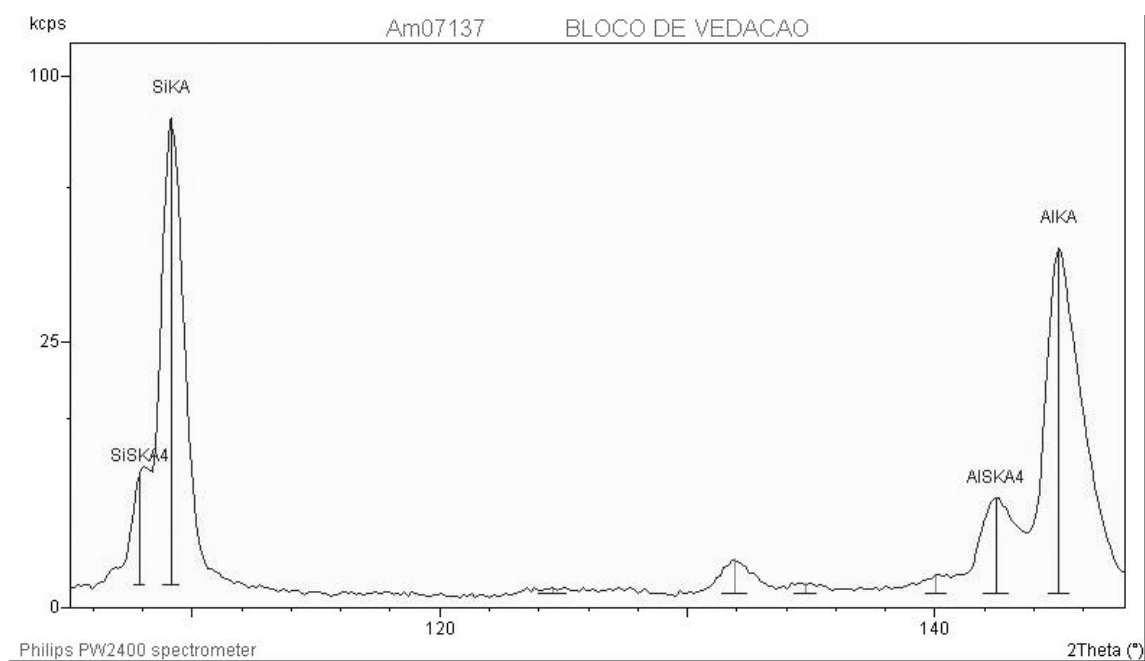
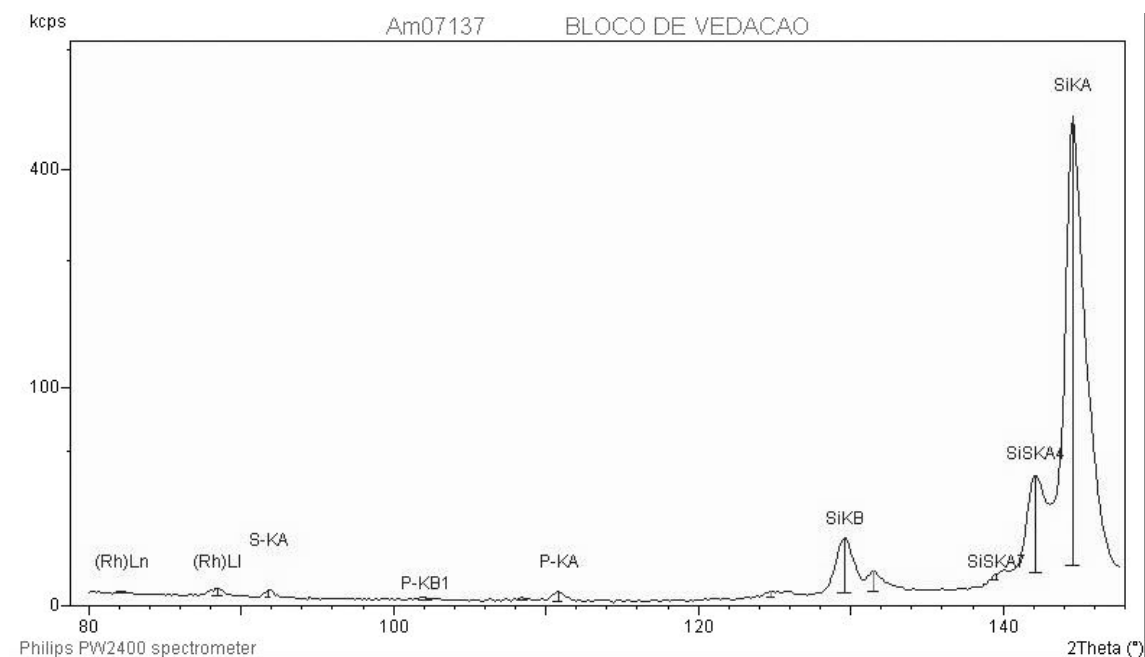
$$VP = VC + \frac{VA}{1 - \frac{P2}{P3}}$$

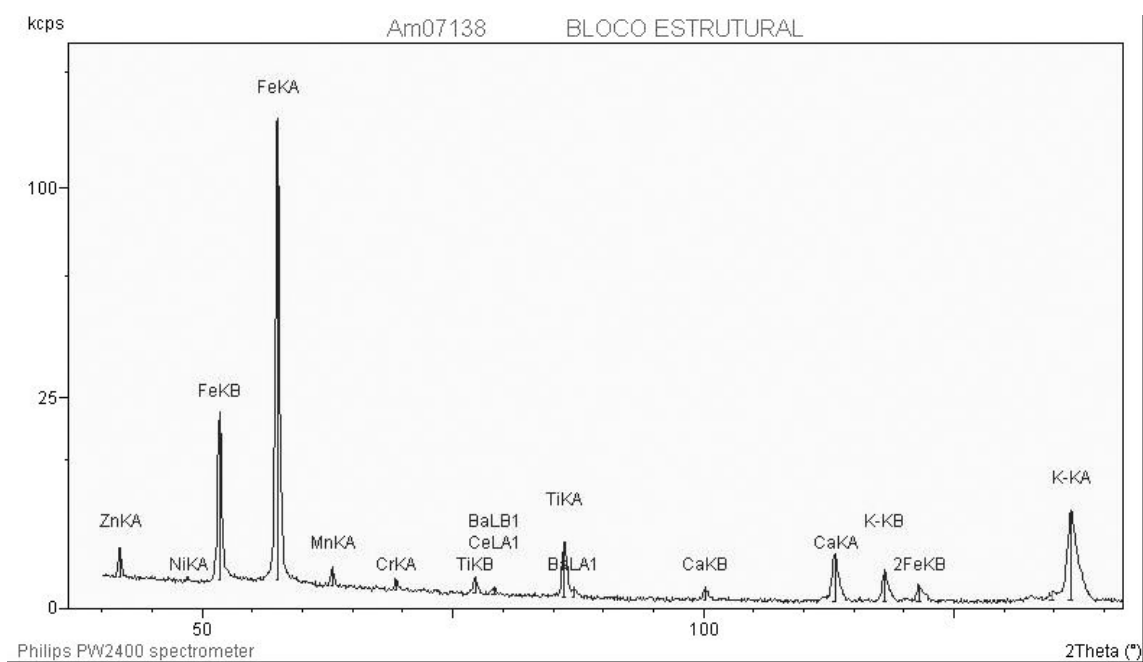
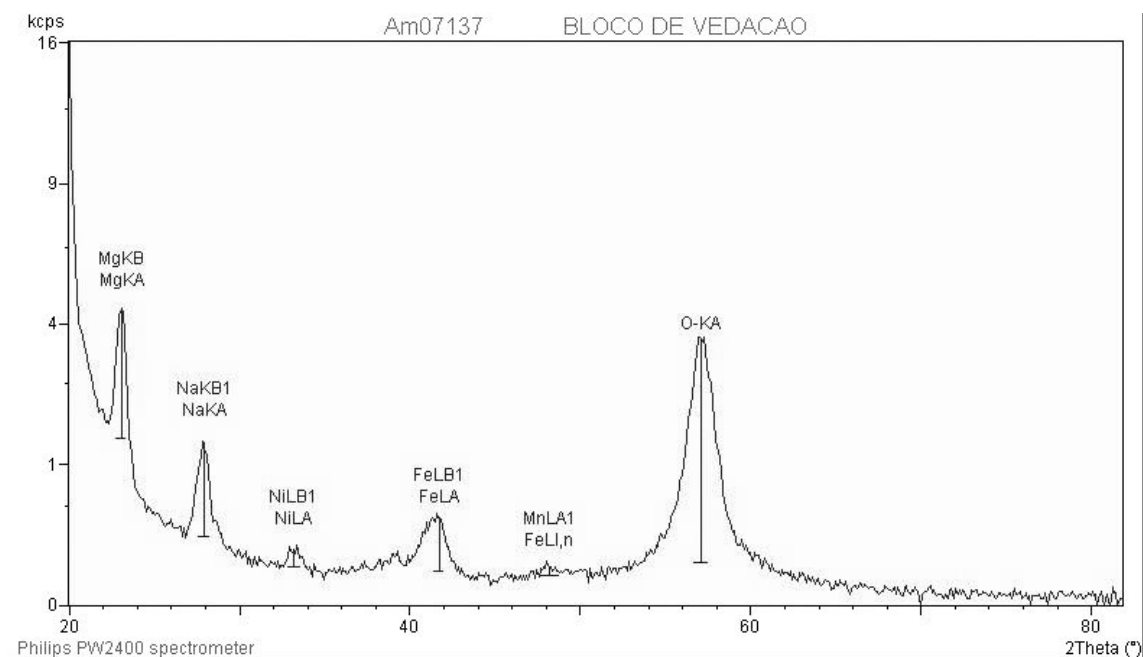
$$\text{Densidade} = \frac{m}{VP}$$

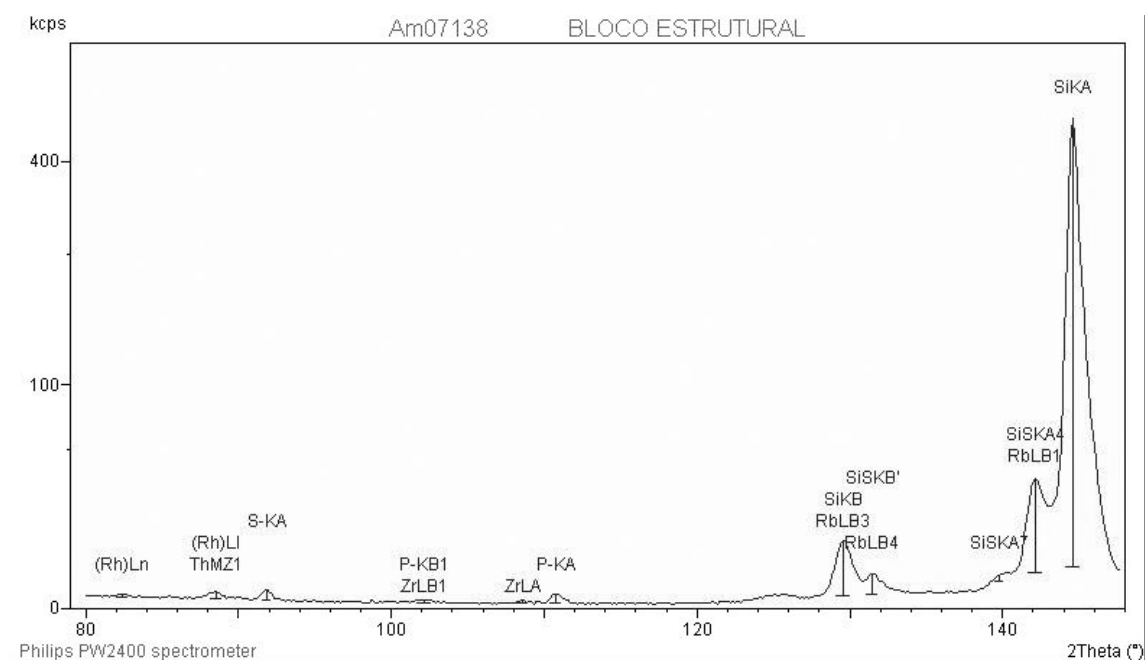
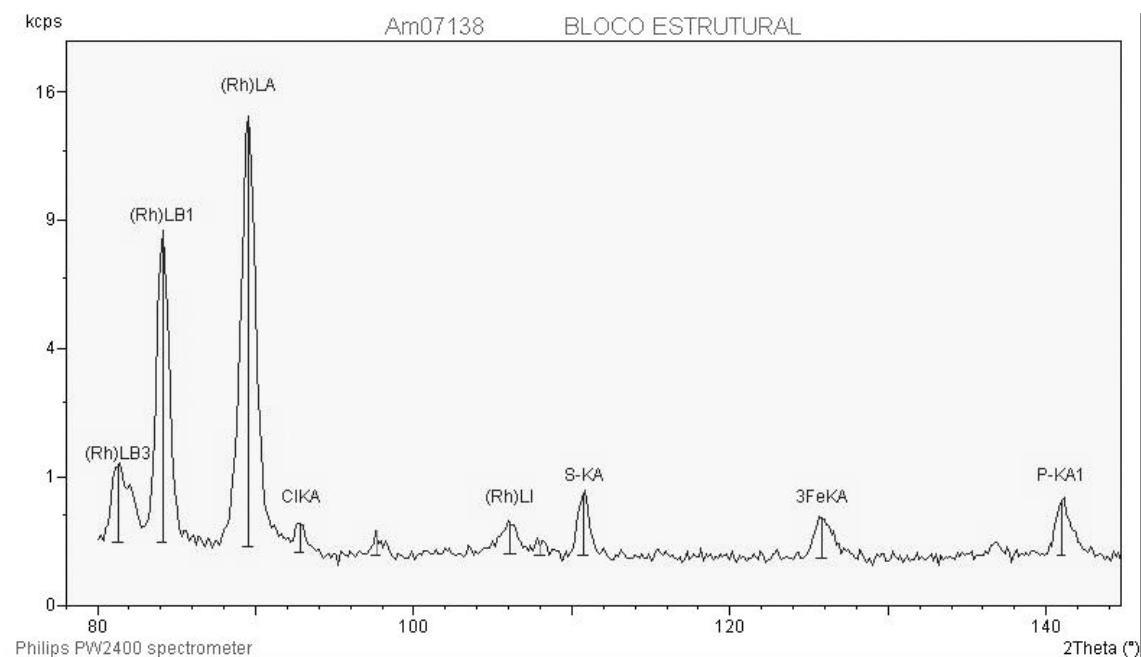
VC = Volume da célula (cm³)
 VP = Volume da Amostra (cm³)
 VA = Volume adicionado (cm³)
 m = Massa da Amostra (g)
 P2 = Leitura da pressão da célula em VA OUT
 P3 = Leitura da pressão da célula em VA IN
☐ Dados colhidos da amostra

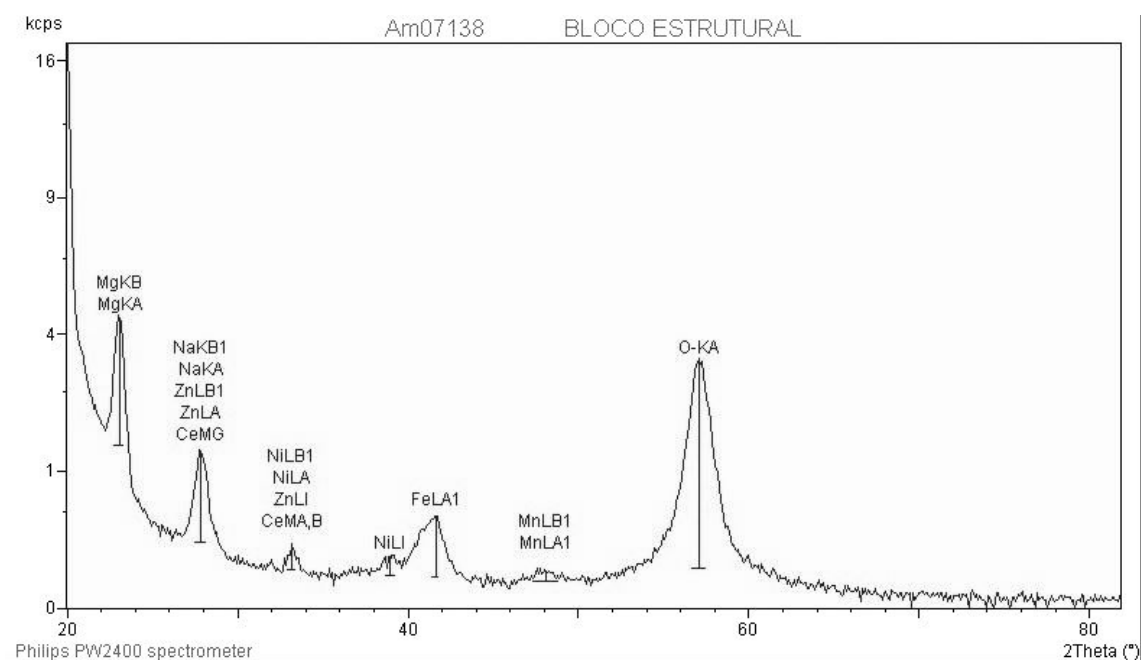
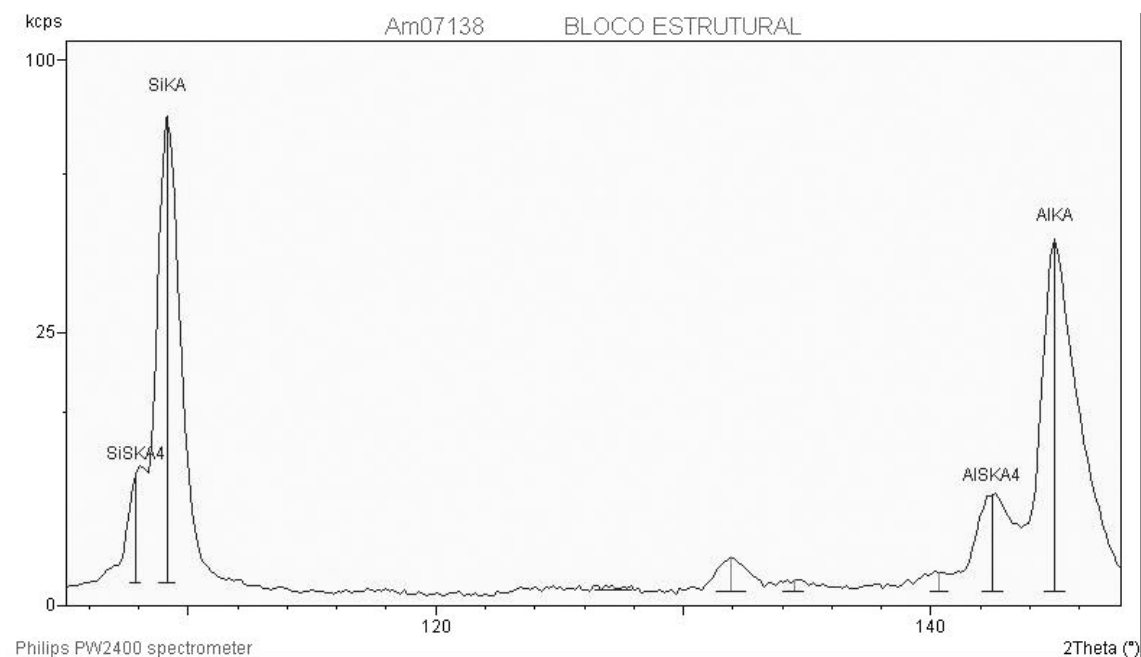
Anexo C – Resultado dos Ensaios de FRX











Anexo D – Análises Químicas (EDS)

Amostra do Bloco de Vedação

ANÁLISE QUÍMICA DOS ÓXIDOS E GERAL (FIGURA 5.25)

Oxide Formula	k-ratio (calc)	Beta Factor	Oxide Wt %	No. of Cations
MgO	0.0041	1.3488	0.55	Mg- 0.114
Al ₂ O ₃	0.2269	1.1872	26.94	Al- 4.399
SiO ₂	0.3972	1.2940	51.40	Si- 7.119
K ₂ O	0.0238	1.1461	2.73	K - 0.483
TiO ₂	0.0116	1.0971	1.28	Ti- 0.133
Fe ₂ O ₃	0.1258	1.1118	13.98	Fe- 1.457
Na ₂ O	0.0018	1.8279	0.34	Na- 0.091
CaO	0.0052	1.0951	0.57	Ca- 0.084
ZnO	0.0189	1.1718	2.21	Zn- 0.226
Total			100.00	14.106

Element	k-ratio (calc.)	ZAF	Atom %	Element Wt %	Wt % Err. (1-Sigma)
Mg-K	0.0033	1.661	0.73	0.55	+/- 0.14
Al-K	0.1732	1.406	28.78	24.35	+/- 0.51
Si-K	0.2928	1.579	52.50	46.23	+/- 0.64
K -K	0.0377	1.237	3.80	4.66	+/- 0.35
Ti-K	0.0124	1.185	0.98	1.47	+/- 0.20
Fe-K	0.1590	1.144	10.39	18.20	+/- 0.58
Na-K	0.0018	2.218	0.55	0.39	+/- 0.10
Ca-K	0.0070	1.166	0.65	0.82	+/- 0.15
Zn-K	0.0277	1.200	1.62	3.33	+/- 0.90
Total			100.00	100.00	

FIGURA 5.26 - PONTO 1

Oxide Formula	k-ratio (calc)	Beta Factor	Oxide Wt %	No. of Cations
Al ₂ O ₃	0.0090	1.7132	1.53	Al- 0.375
SiO ₂	0.0160	1.4101	2.26	Si- 0.468
Fe ₂ O ₃	0.9571	1.0052	96.21	Fe-15.002
Total			100.00	15.844

FIGURA 5.26 - PONTO 2

Oxide Formula	k-ratio (calc)	Beta Factor	Oxide Wt %	No. of Cations
Al ₂ O ₃	0.0521	1.0676	5.56	Al- 0.797
SiO ₂	0.8847	1.0493	92.83	Si-11.292
Fe ₂ O ₃	0.0141	1.1415	1.61	Fe- 0.147
Total			100.00	12.236

FIGURA 5.27 - PONTO 1

Oxide Formula	k-ratio (calc)	Beta Factor	Oxide Wt %	No. of Cations
Al ₂ O ₃	0.0125	1.0639	1.33	Al- 0.189
SiO ₂	0.9672	1.0131	97.98	Si-11.811
Fe ₂ O ₃	0.0061	1.1437	0.69	Fe- 0.063
Total			100.00	12.063

FIGURA 5.27 - PONTO 2

Oxide Formula	k-ratio (calc)	Beta Factor	Oxide Wt %	No. of Cations
Al ₂ O ₃	0.0826	1.4264	11.78	Al- 2.231
SiO ₂	0.2529	1.3174	33.31	Si- 5.351
Fe ₂ O ₃	0.5165	1.0630	54.90	Fe- 6.635
Total			100.00	14.216

Amostra do Bloco de Estrutural

ANÁLISE QUÍMICA DOS ÓXIDOS (FIGURA 5.30)

Oxide Formula	k-ratio (calc)	Beta Factor	Oxide Wt %	No. of Cations
Al ₂ O ₃	0.1969	1.1729	23.09	Al- 3.737
SiO ₂	0.4394	1.2539	55.10	Si- 7.566
K ₂ O	0.0228	1.1465	2.61	K - 0.457
TiO ₂	0.0107	1.0967	1.17	Ti- 0.121
Fe ₂ O ₃	0.1497	1.1142	16.67	Fe- 1.723
MgO	0.0019	1.3326	0.25	Mg- 0.052
Na ₂ O	0.0025	1.8382	0.47	Na- 0.125
CaO	0.0058	1.0949	0.64	Ca- 0.094
Total			100.00	13.874

FIGURA 5.31 - PONTO 1

Element	k-ratio (calc.)	ZAF	Atom %	Element Wt %	Wt % Err. (1-Sigma)
C -K	1.0000	1.000	100.00	100.00	+/- 0.75
Total			100.00	100.00	

FIGURA 5.31 - PONTO 2

Oxide Formula	k-ratio (calc)	Beta Factor	Oxide Wt %	No. of Cations
Al ₂ O ₃	0.0037	1.7262	0.64	Al- 0.159
SiO ₂	0.0089	1.4107	1.26	Si- 0.265
MnO	0.0136	1.0358	1.41	Mn- 0.252
Fe ₂ O ₃	0.9648	1.0022	96.69	Fe-15.320
Total			100.00	15.996

FIGURA 5.32 - PONTO 1

Oxide Formula	k-ratio (calc)	Beta Factor	Oxide Wt %	No. of Cations
Al ₂ O ₃	0.0052	1.0597	0.55	Al- 0.077
SiO ₂	0.9904	1.0042	99.45	Si-11.942
Total			100.00	12.019

FIGURA 5.32 - PONTO 2

Oxide Formula	k-ratio (calc)	Beta Factor	Oxide Wt %	No. of Cations
Al ₂ O ₃	0.0135	1.5299	2.07	Al- 0.441
TiO ₂	0.4674	0.9729	45.47	Ti- 6.178
MnO	0.0288	1.0915	3.14	Mn- 0.481
Fe ₂ O ₃	0.4426	1.0502	46.48	Fe- 6.319
SiO ₂	0.0218	1.2987	2.83	Si- 0.512
Total			100.00	13.930

FIGURA 5.32 - PONTO 3

Element	k-ratio (calc.)	ZAF	Atom %	Element Wt %	Wt % Err. (1-Sigma)
C -K	1.0000	1.000	100.00	100.00	+/- 0.49
Total			100.00	100.00	