

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

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS E DA
VIABILIDADE DO USO DE RESÍDUOS GERADOS
NO POLIMENTO DE ROCHAS GRANÍTICAS COMO
ADIÇÃO EM CONCRETOS**

Moisés Silva Alves

Belo Horizonte

2008

Moisés Silva Alves

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS E DA
VIABILIDADE DO USO DE RESÍDUOS GERADOS
NO POLIMENTO DE ROCHAS GRANÍTICAS COMO
ADIÇÃO EM CONCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil 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: Profa. Dra. Adriana Guerra Gumieri

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2008

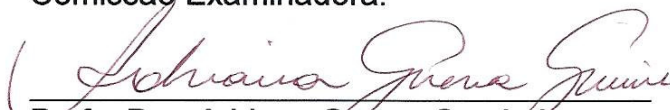
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA DA UFMG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS E DA VIABILIDADE DO USO DE
RESÍDUOS GERADOS NO POLIMENTO DE ROCHAS GRANÍTIAS
COMO ADIÇÃO EM CONCRETOS**

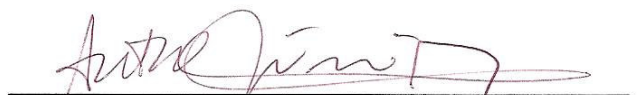
Moisés Silva Alves

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. Dra. Adriana Guerra Gumieri
DEMC / UFMG – (Orientadora)



Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior
DEMC / UFMG



Prof. Dr. Weber Guadagnin Morávia
CEFET/MG

Belo Horizonte, 21 de fevereiro de 2008

A Deus,
à minha amada esposa,
à minha família
e à Profa. Adriana Gumieri

AGRADECIMENTOS

Jamais poderia deixar de agradecer e ser imensamente grato às pessoas que, de alguma forma, contribuíram, mais ou menos efetivamente, para esta conquista.

A Deus, meu guia incondicional em todos os momentos, minha força e sentido da vida.

À minha querida esposa Jeane, pela presença, apoio desmedido em todos os momentos, incentivo e exemplo acadêmico.

À minha família, especialmente meus pais (Athaídes e Luceli), pelos princípios e diretrizes necessários à minha formação pessoal e profissional.

À Professora Adriana Gumieri, pela orientação, paciência e amizade, pelos preciosos ensinamentos de engenharia e lição de vida acadêmica. Deixo minha profunda admiração e gratidão.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG, pelos valiosos ensinamentos necessários para a conclusão deste trabalho.

Aos colegas do mestrado, pelo apoio e pela agradável convivência no período deste curso.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, pela disponibilidade e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Departamentos de Engenharias de Minas e Metalúrgica da Escola de Engenharia da UFMG, especialmente ao Prof. Paulo Brandão.

À Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais – FIEMG, pelo fornecimento de material bibliográfico e contato com as empresas marmorarias.

À empresa Quality Granitos, pelo apoio com o fornecimento das amostras do resíduo de polimento de granito avaliadas neste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT	xv
1 – INTRODUÇÃO	16
2 – OBJETIVOS	18
3 – JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA	19
4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
4.1 – Cenário Nacional das Rochas Ornamentais.....	20
4.2 – Cenário Internacional das Rochas Ornamentais	23
4.3 – Geração de Resíduo e Alternativas de Aproveitamento.....	25
4.3.1 – Resíduos	25
4.3.2 – Classificação dos Resíduos	27
4.3.3 – Fontes Geradoras e Consumidoras de Resíduos	28
4.3.4 – Adições Mineraias Consagradas no Mercado	33
4.3.5 – Avaliação de Estruturas de Concreto por meio de Ensaio Ultra- sônicos	38
4.3.6 – Estudos Relevantes da Utilização de Resíduo de Granitos	39
5 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
5.1 – Seleção de Materiais	41
5.1.1 – Resíduo	41
5.1.2 – Cimento	42
5.1.3 – Agregado Miúdo	43
5.1.4 – Agregado Graúdo	43

5.2 – Métodos.....	43
5.2.1 – Coleta da Amostra do Resíduo	43
5.2.2 – Ensaio de Caracterização do Resíduo	46
5.2.2.1 – Granulometria a Laser.....	46
5.2.2.2 – Área Superficial Específica por Adsorção Gasosa – BET	47
5.2.2.3 – Densidade por Picnometria a Hélio (He)	48
5.2.2.4 – Espectrometria de Fluorescência de Raios-X.....	49
5.2.2.5 – Análise da Composição Química.....	50
5.2.2.6 – Difração de Raios-X	50
5.2.2.7 – Microscopia Eletrônica de Varredura no Resíduo – MEV.....	51
5.2.2.8 – Determinação de Atividade Pozolânica – Método Físico.....	52
5.2.2.9 – Determinação de Atividade Pozolânica – Método Químico.....	53
5.2.3 – Caracterização dos Agregados Envolvidos nos Experimentos	54
5.2.3.1 – Agregado Miúdo	54
5.2.3.2 – Agregado Graúdo.....	54
5.2.4 – Dosagem dos Concretos	55
5.2.5 – Moldagem e Cura dos Corpos de Prova de Concreto	56
5.2.6 – Ensaio Físicos nos Concretos Endurecidos	57
5.2.6.1 – Ultra-sonografia.....	57
5.2.6.2 – Permeabilidade à Água sob Pressão	59
5.2.6.3 – Compressão Axial	63
5.2.6.4 – Porosidade dos Concretos	65
5.2.6.5 – Análise dos Concretos no Microscópio Eletrônico de Varredura..	66
6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
6.1 – Caracterização do Resíduo	68
6.1.1 – Granulometria a Laser.....	68

6.1.2 – Área Superficial Específica por Adsorção Gasosa – BET	69
6.1.3 – Densidade por Picnometria a Hélio (He)	70
6.1.4 – Espectrometria de Fluorescência de Raios-X	70
6.1.5 – Composição Química	71
6.1.6 – Difração de Raios-X	71
6.1.7 – Análise do Resíduo pelo Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV	72
6.1.8 – Determinação de Atividade Pozolânica – Método Físico.....	76
6.1.9 – Determinação de Atividade Pozolânica – Método Químico.....	76
6.2 – Caracterização dos Agregados	78
6.2.1 – Agregado Miúdo	78
6.2.2 – Agregado Graúdo	78
6.3 – Trabalhabilidade do Concreto no Estado Fresco.....	79
6.4 – Ensaio Físicos Realizados nos Concretos Endurecidos.....	81
6.4.1 – Ultra-sonografia	81
6.4.2 – Permeabilidade à Água sob Pressão	82
6.4.3 – Resistência à Compressão Axial.....	85
6.4.4 – Porosimetria por Intrusão de Mercúrio	93
6.4.5 – Análise dos Concretos no Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV	95
7 – CONCLUSÕES	99
8 – SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	102
9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXOS	109
Anexo A – Resultado da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio – Concreto com relação a/c = 0,45 e com 0% de Adição de Resíduo.....	109

Anexo B – Resultado da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio – Concreto com relação a/c = 0,45 e com 20% de Adição de Resíduo.....	115
Anexo C – Resultado da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio – Concreto com relação a/c = 0,65 e com 0% de Adição de Resíduo.....	121
Anexo D – Resultado da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio – Concreto com relação a/c = 0,65, e com 20% de Adição de Resíduo.....	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Distribuição da produção bruta de rochas ornamentais no Brasil	20
Figura 4.2 – Distribuição do consumo interno de rochas, por estados e regiões .	22
Figura 4.3 – Evolução das exportações brasileiras de rochas	25
Figura 4.4 – Fluxograma do beneficiamento do granito	31
Figura 4.5 – Resíduo gerado na lavra – Pó e matacões	31
Figura 4.6 – Resíduo gerado no corte dos blocos.....	32
Figura 4.7 – Resíduo gerado no polimento	32
Figura 4.8 – Resíduo gerado no corte das placas – Aparas em formas irregulares	33
Figura 4.9 – Principais adições minerais utilizadas em concretos estruturais	37
Figura 4.10 – Curvas de Abrams – utilização de resíduo de corte de granito em concretos.....	40
Figura 5.1 – Caixa de armazenamento do resíduo de granito.....	44
Figura 5.2 – Tanque de armazenamento de resíduos de diversos tipos de rocha	45
Figura 5.3 – Ensaio de ultra-sonografia, com transmissão direta.....	58
Figura 5.4 – Permeabilímetro preso à pastilha por dois alicates de pressão	61
Figura 5.5 – Pêndulo enroscado e água sendo adicionada no sistema.	61
Figura 5.6 – Manômetro indicando pressão no sistema igual a 0,4 Bar.....	62
Figura 5.7 – Disco de neoprene – substitui capeamento com enxofre.....	63
Figura 5.8 – Regularização de face com disco de neoprene	64
Figura 5.9 – Prensa Hidráulica de 200 t.f de capacidade.....	64
Figura 6.1 – Curva da distribuição granulométrica do resíduo	69
Figura 6.2 – Espectro de difratometria de raios-X da amostra de resíduo de granito	72
Figura 6.3 – Fotomicrografia da amostra – aumento de 200x.....	73

Figura 6.4 – Fotomicrografia da amostra – aumento de 200x.....	73
Figura 6.5 – Resultado do ensaio de atividade pozolânica – método químico	77
Figura 6.6 – Curva de Abrams compressão axial aos 7 dias	89
Figura 6.7 – Curva de Abrams compressão axial aos 28 dias	90
Figura 6.8 – Resultado do ensaio de compressão axial aos 28 dias.....	90
Figura 6.9 – Fotomicrografia do concreto com $a/c = 0,45$, adição mineral de 0% – aumento de 350X	95
Figura 6.10 – Fotomicrografia do concreto com $a/c = 0,45$, adição mineral de 20% – aumento de 350X	96
Figura 6.11 – Fotomicrografia do concreto com $a/c = 0,65$, adição mineral de 0% – aumento de 350X	97
Figura 6.12 – Fotomicrografia do concreto com $a/c = 0,65$, adição mineral de 20% – aumento de 350X	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Produção de rochas na região Sudeste em 2004.....	21
Tabela 4.2 – Principais rochas produzidas em Minas Gerais no ano de 2004.....	21
Tabela 4.3 – Transações comerciais do setor de rochas no Brasil em 2004	22
Tabela 4.4 – Principais exportadores de rochas em 2004	24
Tabela 5.1 – Características do cimento CP V – ARI, utilizado no estudo	42
Tabela 5.2 – Técnicas de análise química do resíduo de granito.....	50
Tabela 6.1 – Diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} da amostra de resíduo de granito.	68
Tabela 6.2 – Principais elementos presente na amostra de resíduo.....	70
Tabela 6.3 – Composição química do pó de granito.	71
Tabela 6.4 – Principais elementos presentes na área 1 da Figura 6.3.....	74
Tabela 6.5 – Principais elementos presentes na área 2 da Figura 6.3.....	75
Tabela 6.6 – Principais elementos presentes na área 3 da Figura 6.3.....	75
Tabela 6.7 – Ensaio de determinação de atividade pozolânica – método das argamassas.....	76
Tabela 6.8 – Caracterização do agregado miúdo utilizado no estudo.....	78
Tabela 6.9 – Caracterização do agregado graúdo utilizado no estudo	79
Tabela 6.10 – Traços utilizados nos concretos	80
Tabela 6.11 – Resultado do ensaio de ultra-sonografia aos 28 dias.....	81
Tabela 6.12 – Resultado do ensaio de permeabilidade	82
Tabela 6.13 – Resultado do ensaio de compressão axial – 7 dias de idade	86
Tabela 6.14 – Resultado do ensaio de compressão axial – 28 dias de idade.....	87
Tabela 6.15 – Resistência média à compressão axial dos concretos	88
Tabela 6.16 – Análise estatística dos resultados de compressão axial.....	92
Tabela 6.17 – Resultado da Porosimetria por intrusão de Mercúrio.....	93

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Test and Methods

ANOVA – On-Way Analysis of Variance

NBR – Norma Brasileira Registrada

NBR NM – Norma Mercosul

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ACI – American Concrete Institute

BSI – British Standards Institution

ENBRI – European Network of Building Research Institute

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

SINROCHAS-MG – Sindicato Intermunicipal da Indústria de Rochas Ornamentais no Estado de Minas Gerais

ARI – Alta resistência inicial

DEMC – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

BET – Brunauer, Emmett e Teller

PPC – Perda por calcinação

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

EDS – Energy Dispersive Spectrometry

d = Distância interplanar

f_c – Resistência à compressão axial

θ – Ângulo de difração

CP – Corpo de prova

a/c – Relação água/cimento

Slump – Abatimento do tronco de cone

Å – Angstrom - $1 \text{ \AA} = 10^{-1} \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$

kHz – kilo hertz – 1000 hertz

µs – micro segundos - 10^{-6} s

nm – nano metro – $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

EDTA – ácido carboxílico

MPa – Mega Pascal

Bar – unidade de pressão – $1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa}$

t – tonelada

t.f – tonelada força – $1 \text{ tf} = 1000 \text{ kg.f}$

°C – Graus Célsius

K – Graus Kelvin – $0 \text{ K} = -273^\circ\text{C}$

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ – metacaulinita

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

CO_2 – Gás carbônico

Q – Quartzo – SiO_2

A – Anortita – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

Cl – Clinocloro – $\text{CaMg}_{0,77}\text{Fe}_{0,23}(\text{CO}_3)_2$

M – Microlino – KAlSi_3O_8

Mu – Muscovita – $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$

RESUMO

O Brasil é um dos grandes produtores de rochas ornamentais do mercado mundial. Estas rochas são amplamente empregadas na construção civil e seu emprego vem crescendo a cada ano. Com esse crescimento, há também um aumento na geração de resíduos durante seu beneficiamento. O Brasil gera, anualmente, cerca de 280.000 m³ de resíduos, apenas no corte e polimento de granitos. Novas formas de utilização de resíduos contribuem para a diminuição do consumo de matérias-primas não-renováveis, para redução de áreas degradadas pela extração dessas matérias-primas e, até, para redução de áreas de disposição final dos resíduos. As adições minerais são consideradas materiais suplementares adicionados aos cimentos ou aos concretos. O uso de adições minerais tem proporcionado melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade dos concretos. O objetivo deste trabalho é estudar as características e avaliar o uso do resíduo gerado no polimento de placas de granitos como adição mineral em concretos. Procurou-se avaliar a aplicação do resíduo de granito na sua forma original, sem passar pelo processo de moagem, visando sua aplicação de forma mais econômica. Este trabalho envolveu a caracterização do resíduo e dos componentes empregados nos concretos, o estudo da atividade pozolânica e do efeito fíler do resíduo, a determinação das proporções dos materiais empregados nos concretos, e a avaliação da influência das adições minerais nas propriedades dos mesmos. Os ensaios de pozolanicidade, realizados pelos métodos físico e químico, mostraram que o resíduo estudado não apresenta atividade pozolânica. Apesar de o resíduo apresentar em sua composição química o somatório de SiO₂, Al₂O₃, e Fe₂O₃ acima de 50%, este material possui estrutura cristalina, o que desfavorece o desenvolvimento da atividade pozolânica. De modo geral, os concretos com adição do resíduo de granito apresentaram diminuição em sua porosidade e permeabilidade, proporcionando melhoria de suas propriedades no estado endurecido em relação aos concretos de referência. Esta melhoria, certamente, está relacionada ao efeito fíler desta adição.

ABSTRACT

Brazil is one of the great producers of ornamental rocks in the world-wide market. These rocks are widely used in the construction business. It's use has been growing year after year. So has the wastes as it's process take place. Brazil creates yearly, about 280,000 m³ of waste, only by shaping and burnishing granites. Recycling contributes for the reduction of not renewable raw material consumption for the reduction of degraded areas for the extraction of these raw materials and even for the reduction of wastes final disposal areas. The mineral additions are considered material supplemental added to cements or concrete. Using mineral additions has proportionate mechanical improvement properties and durability of the concretes. This goal work is studying the waste features and to evaluate it's use as mineral addition in concrete. The study tries to evaluate the application of the granite waste in its original form. Without milling, searching for a cheaper option at its application of economic form. This work involves the characterization of the waste and of the components used in concrete, the pozzolanic activity study and waste filler effect. Also involves the determination of concrete materials proportion, and the evaluation of mineral additions influence in concrete properties. The pozzolanicity tests were made by physical and chemical methods. They had shown that the studied waste does not present pozzolanic activity. Despite the waste shows in its chemical composition, the sum of SiO₂, Al₂O₃, and Fe₂O₃ higher then 50%, this material has crystal structure. This fact compromises the pozzolanic activity development. In general, the concretes, in addition of the granite waste, had shown porosity and permeability reduction, providing properties improvement en its hard form compared to the reference ones. This improvement certainly is related to this addition filler effect.

1 – INTRODUÇÃO

A maioria dos processos produtivos são potenciais fontes geradoras de resíduos, os quais, em muitos casos, são altamente poluentes ou provocam algum tipo de prejuízo ambiental.

As marmorarias, empresas responsáveis pelo beneficiamento de rochas ornamentais, não fogem a essa regra e geram resíduos que causam grandes transtornos ao meio ambiente, devido aos consideráveis volumes a serem dispostos no mesmo. Desta forma, a reciclagem e o reaproveitamento dos resíduos gerados no beneficiamento de granitos podem ser técnico-econômico e ecologicamente viáveis, minimizando o volume de resíduos dispostos em aterros sanitários e “*bota-foras*” clandestinos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do país e do mundo.

A geração indiscriminada de resíduos nos dias atuais torna-se cada vez mais problemática, causando grande preocupação aos órgãos ambientais, em relação ao armazenamento adequado desses resíduos, os quais, se dispostos de forma não controlada, podem contaminar solos, cursos d’água e até mesmo o lençol freático. O aproveitamento dos resíduos garantirá maior vida útil dos recursos naturais não renováveis.

A adição de minerais finamente moídas ao concreto, normalmente chamados de adições minerais, é prática comum na moderna tecnologia de concreto. Essas adições são utilizadas por razões que vão desde a melhoria da trabalhabilidade do concreto no estado fresco até a garantia da durabilidade necessária às condições de serviço.

O uso de adições minerais pode ser vantajoso sob vários aspectos. Tecnicamente, o aumento da durabilidade é uma das razões mais relevantes para o uso dessas adições, especialmente pozolanas e escória de alto-forno, na produção de cimentos. Há, também, justificativas econômicas, pois várias adições

minerais têm custos e preços menores quando comparadas ao cimento Portland ou ao clínquer Portland.

É importante ressaltar que as adições minerais não são apenas aquelas finamente moídas que sofrem reações químicas com compostos do cimento e melhoram o desempenho dos concretos, ou mantêm este desempenho com um custo reduzido. Essas adições podem ser também inertes na pasta de cimento como os materiais fíleres. As adições minerais inertes não sofrem nenhuma reação química dentro da mistura, porém, podem provocar o refinamento dos poros e maior adensamento do concreto, contribuindo para maior resistência mecânica, menor permeabilidade e conseqüentemente maior vida útil do concreto.

A caracterização e o estudo da viabilidade de aproveitamento do pó gerado nas marmorarias durante o processo de polimento das placas de granito é o objeto de estudo deste trabalho, tendo em vista que a utilização deste material tem sido muito pouco estudada. Portanto, este material merece mais atenção por parte dos pesquisadores, visando mudar sua conotação de resíduo e transformá-lo em um subproduto de maior valor agregado, especialmente para o setor da construção civil. Este estudo avalia o desempenho de concretos com adição de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas.

2 – OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade técnica da utilização do resíduo gerado no beneficiamento de rochas graníticas, especialmente no polimento de placas de granito como adição em concretos estruturais.

Os objetivos específicos do estudo são:

- Caracterização física, química e microestrutural do resíduo;
- Avaliação da atividade pozolânica do resíduo;
- Estudo do proporcionamento ideal de adição do resíduo nos traços de concreto;
- Avaliação da influência da adição do resíduo na trabalhabilidade dos concretos frescos;
- Avaliação das propriedades mecânicas dos concretos com adição do resíduo no estado endurecido, por ensaios destrutivos e não destrutivos;
- Avaliação da durabilidade dos concretos sob o aspecto da porosidade e da permeabilidade;
- Contribuir para um banco de dados técnicos/científicos para a utilização futura dos resíduos de polimento de rochas graníticas em concretos de forma sistêmica, como sub-produtos aplicados em larga escala no mercado.

3 – JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

A enorme geração de resíduos em decorrência da indústria do beneficiamento de rochas ornamentais produzidas em todo Brasil evidencia que este setor atua como grande agente poluidor do meio ambiente, e merece atenção especial, tanto do próprio setor quanto dos órgãos ambientais.

Os dados da produção de rochas ornamentais no Brasil mostram uma exorbitante quantidade de resíduos gerados no beneficiamento das rochas. Apenas nos processos de corte, nos teares, e no polimento, nas máquinas politrizes, estima-se que o Brasil gera, anualmente, mais de 280.000 m³ de resíduo em forma de lama com, partículas de granulometria bastante reduzida (SINROCHAS-MG, 2003). Este montante é equivalente a mais de 56.000 caminhões. Esses dados mostram a necessidade de se estudar possibilidades viáveis da utilização dos resíduos gerados no processo de beneficiamento de rochas ornamentais utilizadas no setor da construção civil.

A busca pelo desenvolvimento sustentável do setor de rochas ornamentais começa com a diminuição dos resíduos gerados, passa pela reutilização de materiais, otimização dos processos produtivos e reciclagem dos resíduos, eliminando a disposição inadequada dos mesmos que, atualmente, vem acontecendo como prática em todo país.

O estudo das características do resíduo e as formas e proporções adequadas para sua utilização visa contribuir para futura regulamentação tecnológica, bem como auxiliar órgãos ambientais a exigirem destinações adequadas dos resíduos gerados pelo setor de rochas ornamentais.

4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 – Cenário Nacional das Rochas Ornamentais

O Brasil é um dos grandes produtores de rochas ornamentais do mercado mundial, sendo responsável pela produção de, aproximadamente, 600 tipos de rochas comerciais, derivadas de quase 1500 jazidas, que são geridas por cerca de 300 empresas mineradoras. Só no beneficiamento de granitos e mármore, cerca de 250 empresas administram mais de 1500 teares, com capacidade produtiva de 40 milhões de m²/ano. O acabamento final nas rochas é executado por mais de 6.500 marmorarias em todo Brasil (SINROCHAS-MG, 2003). Do total da produção de rochas no país, 74% estão concentrados na região Sudeste, conforme Figura 4.1.

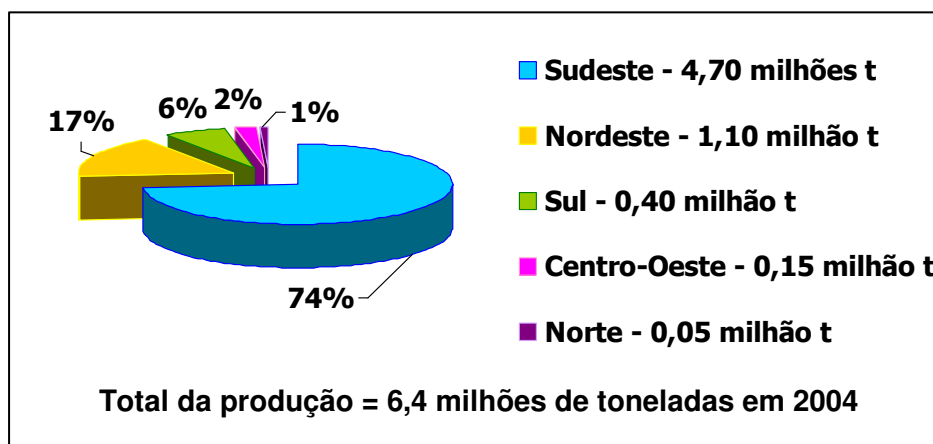


Figura 4.1 – Distribuição da produção bruta de rochas ornamentais no Brasil

Fonte: SINROCHAS, 2005

O estado de Minas Gerais é o segundo maior produtor brasileiro em quantidade e o primeiro em diversidade de rochas ornamentais. A Tabela 4.1 mostra os quantitativos da produção de rochas ornamentais na região Sudeste, bem como a diversidade de rochas existentes em cada estado. Essa produção é distribuída em 160 lavras ativas em mais de 50 cidades (SINROCHAS-MG, 2003).

Tabela 4.1 – Produção de rochas na região Sudeste em 2004

Estado	Produção (1.000 t)	Tipo de Rocha
Espírito Santo	2.800	Granito e mármore
Minas Gerais	1.650	Granito, ardósia, quartzito foliado, pedra sabão, pedra talco, serpentinito, mármore e basalto
Rio de Janeiro	250	Granito, mármore e pedra paduada
São Paulo	50	Granito, quartzito foliado e ardósia

Fonte: ABIROCHAS (2005)

O granito é a principal rocha ornamental produzida em Minas Gerais, sendo responsável por mais de 37% do total produzido no estado (SINROCHAS, 2005), conforme mostra a Tabela 4.2

Tabela 4.2 – Principais rochas produzidas em Minas Gerais no ano de 2004

Rocha	Produção (t)	Participação percentual
Granito	614.000	37,2%
Ardósia	600.000	36,4%
Quartzitos foliados	350.000	21,2%
Outros	86.000	5,2%
Total	1.650.000	100,0%

Fonte: ABIROCHAS (2005)

A região Sudeste, além de maior produtora, é o maior pólo consumidor do país, com 75% do consumo nacional, com 25 kg de rocha por habitante. (Figura 4.2)

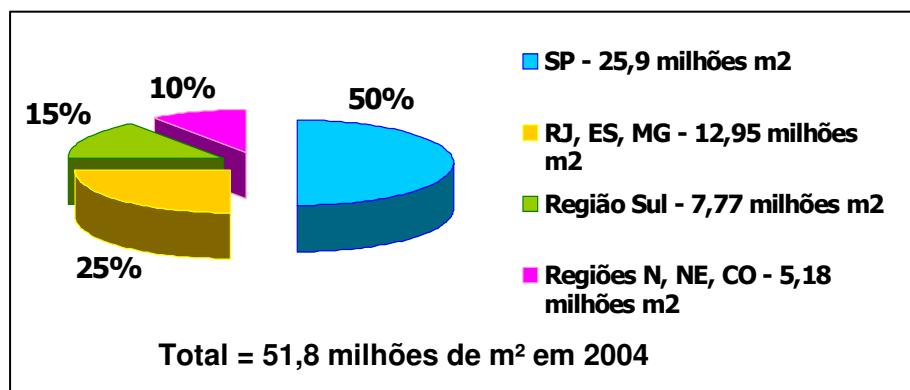


Figura 4.2 – Distribuição do consumo interno de rochas, por estados e regiões
Fonte: SINROCHAS, 2005

O setor de rochas ornamentais é de grande importância para a economia do país, sendo responsável por mais de 114.000 empregos diretos e movimentando mais de US\$ 2 bilhões em 2002 (ABIROCHAS, 2003). Somente em 2004, o setor comercializou US\$ 2,8 bilhões (SINROCHAS, 2005), conforme distribuição mostrada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Transações comerciais do setor de rochas no Brasil em 2004

Estado	Movimento em US\$ milhões	Percentual (%)
São Paulo	850	30,5
Espírito Santo	700	25,0
Minas Gerais	450	16,0
Rio de Janeiro	350	12,5
Outros estados	450	16,0
Total	2.800	100,0

Fonte: SINROCHAS, 2005

Diante dos dados da produção de rochas ornamentais no Brasil, pode-se estimar que a geração de resíduos é bastante elevada. Apenas nos processos de corte e polimento, a rocha sofre um desgaste de no mínimo 7 mm. Com uma capacidade produtiva anual de 40 milhões de metros quadrados de rocha (SINROCHAS-MG,

2003), estima-se uma geração de mais de 280.000 m³ de resíduo de polimento de rocha granítica, de granulometria bastante reduzida. Esses dados mostram a necessidade de estudar alternativas viáveis de se utilizar os resíduos gerados no beneficiamento de rochas ornamentais no setor da construção civil no país.

4.2 – Cenário Internacional das Rochas Ornamentais

O Brasil é um dos principais exportadores de rochas ornamentais do mercado mundial, e vem, cada vez mais, ganhando forças e ampliando sua participação no cenário internacional. Este crescimento tem sido gradativo e constante nos últimos anos.

Em 2001, o país tornou-se o 5º maior exportador mundial de rochas ornamentais, sendo o 4º maior exportador de granitos brutos e o 8º maior exportador de rochas processadas (REDE ROCHAS, 2004). É importante ressaltar que o aumento na participação de rochas processadas, contribui favoravelmente ao aumento do valor agregado do produto e, por outro lado, aumenta o volume de resíduos gerados no processamento, tornando, portanto, cada vez mais necessário os estudos alternativos para destinação final desses resíduos.

Em 2002, as exportações brasileiras de rochas ornamentais atingiram US\$ 338,8 milhões. Somente o estado de Minas Gerais foi responsável por US\$ 77,17 milhões em exportação naquele ano, o que corresponde a quase 23% do total comercializado internacionalmente pelo setor (ABIROCHAS, 2003).

Em 2003, as rochas processadas corresponderam a 67,9% do faturamento com exportações de rochas e 37,4% do volume total exportado pelo país. O setor foi responsável por US\$ 430 milhões em exportações, sendo que, deste montante, Minas Gerais foi responsável por US\$ 94 milhões (ABIROCHAS, 2004).

O ano de 2004 surpreendeu positivamente, com um aumento de quase 40% nos valores exportados, superando a marca de US\$ 600 milhões, valor este, que era

esperado para o ano de 2006. Este valor, convertido em peso, é equivalente a 1.840.634 toneladas de rocha. É importante ressaltar que as chapas de granitos correspondem a 55,06% do total exportado no ano. A Tabela 4.4 apresenta os principais exportadores de rochas naquele ano (ABIROCHAS, 2005).

Tabela 4.4 – Principais exportadores de rochas em 2004

Estado	Valor Exportado US\$ milhão	Participação no Faturamento		Participação Exportações Brasileiras
		Rochas Brutas	Rochas Processadas	
Espírito Santo	337,4	29,3%	70,7%	56,1%
Minas Gerais	119,0	25,5%	74,5%	19,8%
Rio de Janeiro	45,1	4,3%	95,7%	7,5%
São Paulo	20,6	11,5%	88,5%	3,4%
Bahia	19,3	92,2%	7,8%	3,2%
Paraná	13,3	0,9%	99,1%	2,2%
Ceará	12,2	63,7%	36,3%	2,0%
Total	566,9			94,3%

Fonte: SINROCHAS, 2005

Acompanhando os consecutivos crescimentos anuais, o ano de 2005 fechou com um faturamento de US\$ 790 milhões, relativos à comercialização de 2.157.455 toneladas de rochas brutas e processadas, apresentando um crescimento de 31,5% em relação a 2004. Destaca-se, neste ano, que o volume físico de exportação de rochas processadas superou o volume de exportações de rochas brutas, com 50,96% do total das exportações de rochas.

O ano de 2006 surpreendeu o setor de rochas ornamentais e superou a marca de US\$ 1 bilhão em exportações de rochas brutas e processadas, referentes à 2.584.726 toneladas. A Figura 4.3 mostra a evolução do volume físico das exportações brasileiras de rochas ornamentais, um crescimento de 135% em nove anos e também o crescimento das exportações de rochas processadas.

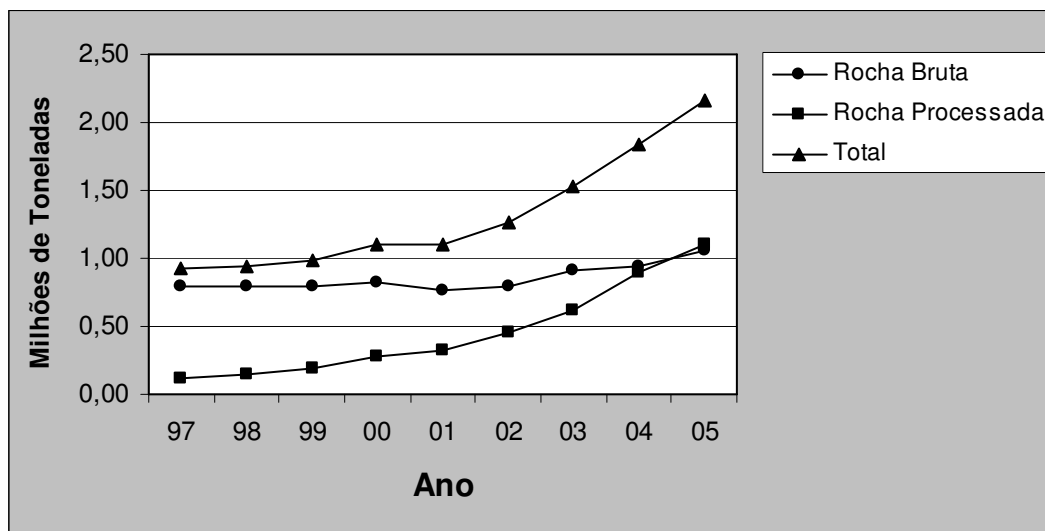


Figura 4.3 – Evolução das exportações brasileiras de rochas
Fonte: ABIROCHAS, 2006.

Este crescimento na comercialização de rochas processadas implica que, cada vez mais, o Brasil agrega valor a este produto e valoriza a indústria nacional. No entanto, quanto maior o volume de rochas processadas pelo país, mais resíduos são gerados pelo setor. Com isso, torna-se cada vez mais necessários pesquisas e estudos na busca de alternativas viáveis para utilização dos resíduos gerados no processamento de rochas ornamentais, visando minimizar os impactos negativos causados com a disposição inadequadas desses resíduos.

4.3 – Geração de Resíduo e Alternativas de Aproveitamento

A maior parte dos processos produtivos e indústrias de transformação são grandes fontes geradoras de resíduos, nos três estados da matéria: sólidos, líquidos ou gases, os quais, geralmente, provocam grandes impactos ambientais e contribuem para a degradação e para o prejuízo do meio ambiente.

4.3.1 – Resíduos

Atualmente, os termos, “resíduo” ou “rejeito” são empregados para referenciar o material gerado no polimento de granito. Portanto, para facilitar a comunicação,

neste trabalho, optou-se por adotar apenas o termo “resíduo”, pois trata-se de um material com pouquíssima utilização e ainda não se sabe sua viabilidade técnica, nem mesmo possui qualquer aprovação para uso dos órgãos ambientais.

A norma brasileira que trata do assunto, NBR 10.004 (2004) - Resíduos Sólidos: classificação, define resíduo sólido como sendo:

“Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviço e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistema de tratamento de água”.

O reaproveitamento e a reciclagem dos resíduos e o melhor aproveitamento das matérias-primas são vistos por especialistas como a mais eficiente e talvez a única saída para a continuidade do progresso tecnológico do planeta, pois essas medidas atuam em sintonia com as necessidades do mundo atual (MINAS AMBIENTE, 1999). A ciência alavanca a tecnologia, buscando minimizar impactos, diminuir emissões poluidoras e maximizar a vida útil dos recursos naturais não renováveis.

Segundo o CONAMA (2002), o reaproveitamento de resíduos pode ser abordado com três enfoques distintos:

- recuperação: compreende na extração e remoção de algumas substâncias presentes nos resíduos, como óxidos, metais e etc;
- reutilização: é o processo de reaplicação de um resíduo, sem que haja qualquer transformação ou beneficiamento do mesmo;
- reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após este ter sido submetido a algum tipo transformação.

A pesquisa com foco na caracterização e no desenvolvimento de tecnologias e processos que possivelmente viabilizem a utilização de um determinado resíduo é importante tanto do ponto de vista econômico quanto social. Para tanto, o resíduo deve apresentar:

- grandes volumes gerados;
- baixo custo de aquisição;
- propriedades que atestem bom desempenho para a aplicação desejada;
- problemas ambientais com sua estocagem, para que, quando forem utilizados, minimizem ou eliminem este problema.

4.3.2 – Classificação dos Resíduos

A classificação de um resíduo é fundamental para seu possível aproveitamento, pois as decisões técnicas e econômicas a serem tomadas em todas as etapas do tratamento deste material, como manipulação, armazenagem, coleta, transporte e disposição final, deverão estar de acordo com a classificação dos mesmos, e cada um necessita de cuidados e técnicas diferenciadas.

A Norma Brasileira NBR 10.004 (2004) – Resíduos Sólidos: classificação – classifica os resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, indicando quais resíduos devem possuir maior controle e rigor em seu manuseio e destinação. Os resíduos são classificados como:

- classe I - perigosos;
- classe II - resíduos não perigosos, que pode ser dividida em:
 - a) classe II A - resíduos não inertes;
 - b) classe II B - resíduos inertes.

Para se classificar os resíduos, utilizam-se os ensaios de lixiviação e de solubilização. A norma NBR 10.005 (2004) – Lixiviação – de Resíduos, fixa as condições exigíveis para a lixiviação de resíduos. Já o ensaio de solubilização é realizado de acordo com a NBR 10.006 (2004) – Solubilização de resíduos – e destina-se a diferenciar os resíduos inertes dos não-inertes, através da identificação dos constituintes solubilizados em concentrações superiores ao padrão da água.

4.3.3 – Fontes Geradoras e Consumidoras de Resíduos

De todos os processos produtivos, o setor da construção civil destaca-se como um grande consumidor de matérias-primas naturais, sejam elas renováveis ou não renováveis. Apenas na produção de argamassas e concretos, o Brasil consome aproximadamente 220 milhões de toneladas de agregados naturais (JOHN, 2000).

Segundo o ENBRI (European Network of Building Research Institute), a construção civil consome, aproximadamente, 4,5% do total da energia consumida no planeta. Segundo JOHN (1999), 84% da energia consumida pela construção civil, é consumida na fase de produção dos materiais utilizados no setor.

No entanto, a construção civil não traz apenas ônus ao meio ambiente. Ela é, também, uma das mais eficazes alternativas de consumo de materiais reutilizados ou reciclados. É importante ressaltar que a reciclagem de alguns materiais pode, muitas vezes, gerar produtos com características muito semelhantes às características de matérias-primas naturais, e às vezes com características até superiores. As principais vantagens da reciclagem são:

- preservação dos recursos naturais não renováveis;
- redução do consumo de energia na produção de matérias primas;
- redução do volume nos aterros e de bota-foras clandestinos;
- geração de empregos nos processos de reciclagem;

A criação de programas nacionais em todo o mundo, direcionados à adoção de estratégias de desenvolvimento sustentável compatíveis às necessidades de redução dos processos de extração e de uso dos recursos naturais, sinalizam para a necessidade de se implementar, no Brasil, um programa de manejo, aproveitamento e agregação de valor aos resíduos gerados pelo setor da construção civil. É importante ressaltar que o setor da construção civil possui uma estreita relação de fornecimento e consumo com o setor da mineração. Com isso, ao se implementar formas de aproveitamento de resíduos, que substituam materiais fornecidos pelo setor de mineração, esta relação de fornecimento e consumo, entre os dois setores, passará por ajustes e rearranjos em suas estruturas.

No Brasil, o poder público tem demonstrado preocupação com a utilização de resíduos de construção civil, bem como com os de outras indústrias. Para isso, em julho de 2002, o governo publicou o projeto dos resíduos da construção civil estabelecido pela Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), já em vigor desde 02 de janeiro de 2003.

O esforço e a conscientização da sociedade brasileira têm levado à aceitação e à crescente utilização de produtos reciclados provenientes dos resíduos da construção civil.

A produção de agregados reciclados, utilizando o entulho de construção, como fonte de matéria-prima é uma atividade que, nos últimos anos, tem se consolidado no país. São observadas, portanto, um número crescente de plantas de reciclagem sendo implantadas em diversos municípios, geradas tanto pelo setor privado quanto pelo poder público.

A utilização de novos materiais pela indústria da construção civil, sobretudo resíduos provenientes de processos industriais, tem sido cada vez mais intensa. Sugerem-se três razões básicas à essa realidade: a primeira, deve-se ao grande volume de materiais que a construção civil demanda; a segunda, é a variação e flexibilidade de qualidade e formas dos materiais utilizados, e a terceira é devido à

vinculação do setor à soluções eficazes para preservação e proteção do meio ambiente.

Para que se tenha uma gestão sustentável dos resíduos gerados em todos os setores da economia, é necessário reduzir ao máximo a geração do resíduo na fonte; sempre que possível, reutilizar os materiais; reciclar sempre e depositar o que não foi possível reaproveitar em aterros controlados ou aterros sanitários.

A redução dos resíduos gerados nos processos produtivos esbarra em limitações financeiras para micro e pequenas empresas e em dificuldades técnicas e de adequações dos processos para as médias e grandes empresas. Essa redução envolve otimização dos processos produtivos, o que, na maioria das vezes, tem custos elevados. Desta forma, os resíduos sempre existirão, seja em grande ou pequena quantidade.

Atualmente, a reciclagem tem contribuído não apenas para a diminuição do consumo de matérias-primas não renováveis, mas também, para a diminuição de áreas destinadas à disposição final de resíduos, sejam elas administradas de forma controlada ou como bota-foras clandestinos, os quais são, geralmente, grandes causadores de impactos ambientais desagradáveis.

As marmorarias têm expressiva contribuição na produção de resíduos sólidos, promovidos pelo beneficiamento de rochas ornamentais. O beneficiamento do granito, por exemplo, possui quatro pontos de geração de resíduos, que são: resíduo da lavra, na extração dos blocos, na jazida; resíduo do corte do granito, gerado no desdobramento dos blocos em placas; resíduo do polimento das placas de granito, gerado no acabamento superficial das placas; e resíduo do corte, gerando rebarbas e cacos de granito com formas bastante irregulares. Todas essas etapas podem ser vistas no fluxograma de beneficiamento do granito na Figura 4.4, sendo que o objeto de estudo deste trabalho é o “resíduo do polimento”, em destaque na figura. As Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam as etapas de geração de resíduo para as etapas do processo completo de beneficiamento dos granitos.

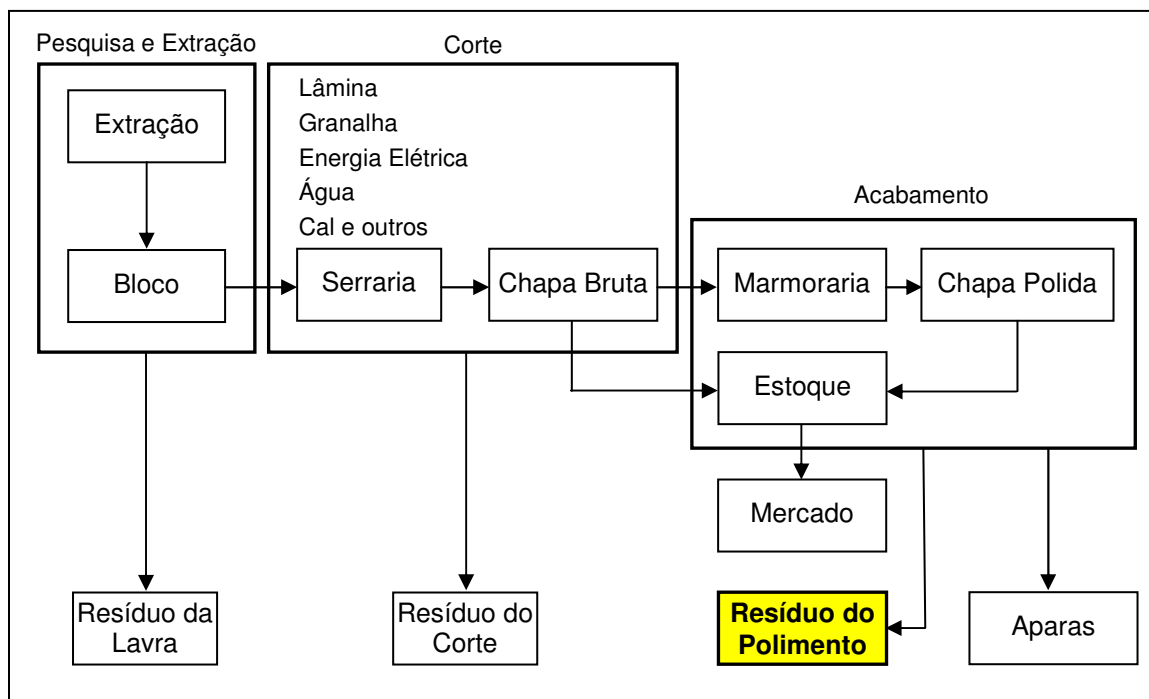


Figura 4.4 – Fluxograma do beneficiamento do granito

Fonte: adaptado de GONÇALVES, 2000

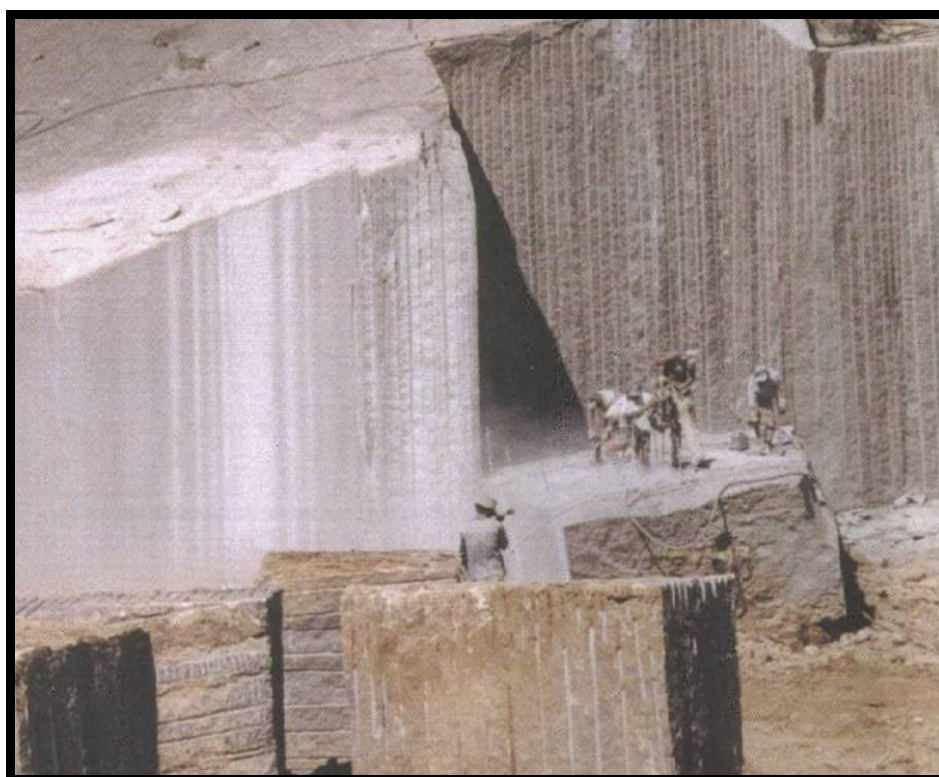


Figura 4.5 – Resíduo gerado na lavra – Pó e matacões



Figura 4.6 – Resíduo gerado no corte dos blocos

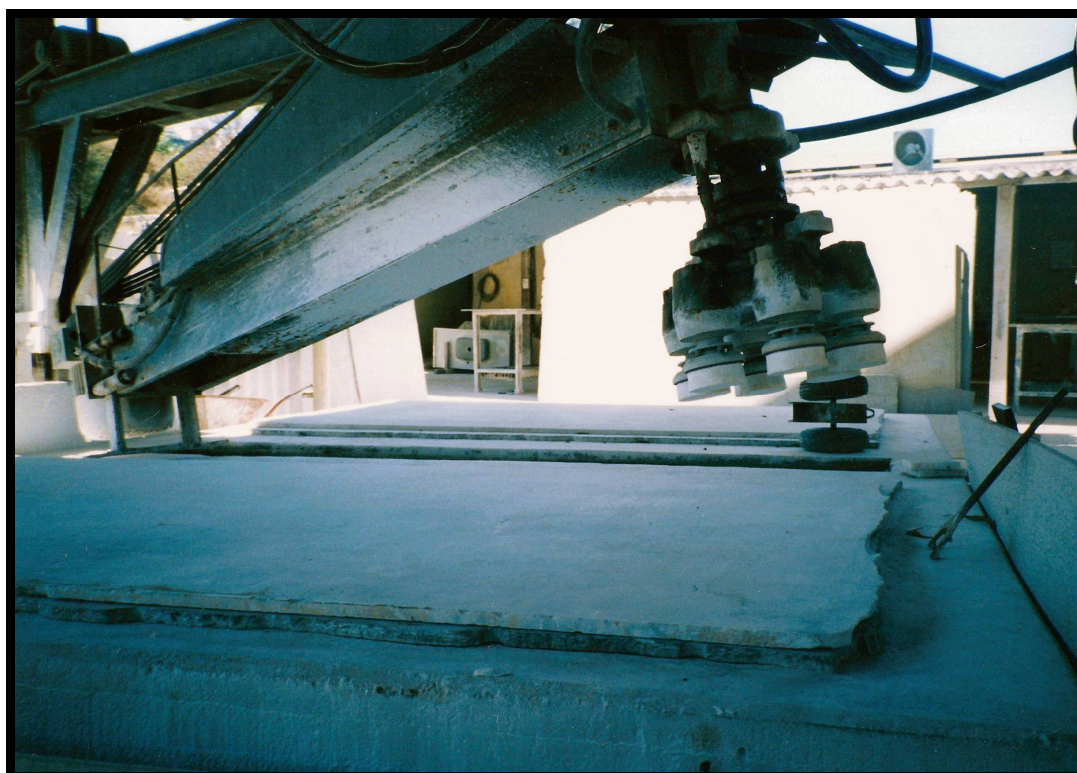


Figura 4.7 – Resíduo gerado no polimento



Figura 4.8 – Resíduo gerado no corte das placas – Aparas em formas irregulares

Os granitos são altamente empregados na indústria da construção civil, e seu emprego vem crescendo a cada ano. Com esse crescimento, há também um aumento no volume de resíduos gerados em seu beneficiamento. Estima-se que o Brasil gera, anualmente, cerca de 400.000 toneladas de resíduos apenas nos processos de corte e de polimento de granitos (SINROCHAS-MG, 2003).

4.3.4 – Adições Minerais Consagradas no Mercado

É relevante ressaltar a importância desses estudos na busca de uma utilização viável para o resíduo de granito. Num passado recente, as indústrias siderúrgicas tinham grandes problemas com a destinação final da volumosa massa de escórias geradas nos alto-fornos, na produção de ferrogusa. As empresas gastavam verdadeiras fortunas com o transporte e destino final dessas escórias. Devido a importantes estudos de caracterização e utilização desses resíduos, eles deixaram de ser denominados por resíduos, termo pejorativo, e se

transformaram, principalmente, em subproduto da indústria cimenteira, ganhando valores agregados expressivos. Hoje, portanto, as siderúrgicas lucram com a grande demanda do mercado por esses materiais. Este material já é tão consagrado que a NBR 5735 – Cimento Portland de alto forno (ABNT, 1991) define o cimento de escória de alto forno (CP III), com teores de escória variando de 35 a 70% da massa total do material aglomerante. Já a NBR 11.578 – Cimento Portland composto (ABNT, 1991) define o cimento composto com escória (CP IIE), com um percentual que pode variar de 6 a 34% de escória. Com esta consagração, o co-processamento no setor cimenteiro já é uma prática extremamente difundida.

Outros bons exemplos de resíduos que ganharam expressão no mercado, e hoje possuem expressivos valores agregados, são a sílica ativa e o metacaulim.

A sílica ativa, até pouco tempo, era considerada um passivo ambiental na produção de silício metálico e ferro-silício, pois as cinzas, de partículas extremamente reduzidas, geradas na produção destes produtos, eram descarregadas ao meio ambiente, em forma de fumaça, sem nenhum tratamento prévio, o que proporcionavam grandes discussões e problemas com os órgãos ambientais competentes. Porém, após importantes estudos de caracterização e utilização, a sílica ativa deixou de ser um resíduo, e hoje é um elemento imprescindível na produção de concretos de alto desempenho (JUCÁ, T. P. et al, 2001)

O metacaulim é uma adição mineral silicoaluminosa obtida, normalmente, da calcinação de alguns tipos de argila, como as cauliníticas e os caulins. A calcinação é realizada em temperaturas que variam de 600°C a 900°C. O metacaulim é também obtido por meio do tratamento do resíduo da indústria produtora de papel, constituído, basicamente, de um caulim beneficiado de extrema brancura, finura e pureza. Este resíduo gera um metacaulim de altíssima qualidade, pois proporciona a produção de um metacaulim de alta reatividade. As argilas por si só não são pozolânicas, porém, quando submetidas a temperaturas entre 600°C a 900°C, ocorre a remoção dos íons hidroxila da sua estrutura

cristalina, ocasionando a destruição do seu arranjo atômico. Forma-se, então, um componente amorfo de grande instabilidade química, denominado metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), que é responsável pela atividade pozolânica, com formação predominante de C-S-H. Com essas características pozolânicas de alta reatividade, o metacaulim vem ganhando o mercado e já se tornou importante elemento na produção de concretos estruturais de obras de grande responsabilidade e que exigem excelente desempenho, bem como altas resistências mecânicas.

A incorporação de adições minerais nos materiais a base de cimento permite a redução da poluição gerada. Por exemplo, a incorporação de escórias e pozolanas reduz, substancialmente, a produção de CO_2 no processo de produção do cimento, tendo em vista que, para cada tonelada de clínquer produzido, é lançado no meio ambiente uma tonelada de gás carbônico (PETRUCCI, 1975).

As adições minerais podem ser classificadas em três grupos, de acordo com sua ação físico-química:

- Material pozolânico;
- Material cimentante;
- Fíler.

O material pozolânico é definido pela ASTM C 618 (1978) e pela NBR 12.653 (1992) – Materiais pozolânicos – como um material silicoso ou sílico-aluminoso que, por si só, possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes. Como exemplos, pode-se citar a cinza volante com baixo teor de cálcio, as cinzas vulcânicas como pozolanas naturais, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim. A norma NBR 12.653 (1992) – Materiais Pozolânicos – classifica as pozolanas, quanto à sua origem, em:

- a) Pozolanas naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido ($\geq 65\%$ de SiO_2) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica;
- b) Pozolanas artificiais: materiais provenientes de tratamento térmico (argilas calcinadas ou termicamente ativadas) ou subprodutos industriais com atividade pozolânica, como a cinza volante, cinza de casca de arroz, sílica ativa, entre outras.

Tanto as pozolanas naturais como as artificiais podem necessitar de um processamento adicional (britagem e moagem) para se adequarem como materiais pozolânicos para uso em cimentos e concretos.

O material cimentante não necessita de hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como o C-S-H. No entanto, sua auto-hidratação é normalmente lenta, e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais. Quando usado como adição ou substituição em cimento Portland, a presença de hidróxido de cálcio e gipsita acelera sua hidratação, como é o caso da escória granulada de alto-forno. (DAL MOLIN, 1995).

O fíler é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química, ou seja, sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para hidratação dos grãos de cimento. Vários podem ser os efeitos físicos gerados pelas adições nos concretos, como mostrado a seguir: (DAL MOLIN, 1995)

- a) Efeito microfíler: aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, cujo diâmetro médio deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento;

- b) refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento: causado pelas pequenas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação. Desta forma, o crescimento dos cristais ocorrerá não somente a partir da superfície dos grãos de cimento, mas também nos poros ocupados pela adição e pela água, acelerando as reações e influenciando os tipos de produtos de hidratação formados. A adição diminui os espaços nos quais os produtos de hidratação podem crescer, gerando um grande número de pequenos cristais ao invés de poucos cristais de grande tamanho.
- c) Alteração da microestrutura da zona de transição: a colocação de adições finamente divididas no concreto interfere na movimentação das partículas de água em relação aos sólidos da mistura, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que, normalmente, fica retido sobre os agregados. Com isso, há uma melhora significativa da zona de transição, refletindo num aumento de desempenho do concreto sob o ponto de vista tanto mecânico como de durabilidade.

As adições minerais mais comumente utilizadas em concretos estruturais estão apresentadas na Figura 4.9, classificadas de acordo com sua forma de ação.

Cimentantes	⇒	Escória granulada de alto-forno
Cimentantes e pozolânicos	⇒	Cinza volante com alto teor de cálcio (CaO 10%)
Superpozolanas	⇒	Sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz produzida por combustão controlada (predominantemente amorfa)
Pozolanas comuns	⇒	Cinza volante com baixo teor de cálcio (CaO < 10%), argilas calcinadas, cinzas vulcânicas
Pozolanas pouco reativas	⇒	Escórias de alto-fornos resfriadas lentamente, cinza de casca de arroz predominantemente cristalina
Fíler	⇒	Calcário, pó de quartzo, pó de pedra (pó de granito)

Figura 4.9 – Principais adições minerais utilizadas em concretos estruturais

Fonte: adaptação de GONÇALVES, 2000 E MEHTA E MONTEIRO, 1994

4.3.5 – Avaliação de Estruturas de Concreto por meio de Ensaio Ultra-sônicos

Os ensaios não destrutivos, em especial as ultra-sonografias, são muito úteis no diagnóstico de estruturas e de elementos de concreto, pois permitem realizar um acompanhamento das características do material ao longo de sua vida útil. Pela análise dos dados obtidos nestes ensaios, pode-se averiguar a uniformidade do concreto, controlar sua qualidade, acompanhar sua deterioração e, por comparação com corpos de prova (CP) de referência, pode-se, até mesmo, estimar sua resistência à compressão axial.

Com o objetivo de facilitar e difundir a implementação do ensaio de ultrassonografia em estruturas de concreto, acredita-se que seria fundamental desenvolver ferramentas de suporte adequadas para fazer com que a análise seja feita de forma mais simples e que produza resultados confiáveis. O uso de redes neurais artificiais é visto como uma atraente alternativa para produção destas ferramentas que venham tornar mais simples e confiáveis os ensaios e resultados da ultrassonografia em concretos (CAETANO e DA SILVA FILHO, 2003)

Os métodos de avaliação e comparação que estimam as resistências de estruturas submetidas à uma onda ultra-sônica são métodos estudados ao longo de anos, com uma extensa análise experimental. O método descrito na norma britânica BSI 1881, Parte 206 – Ultrasonic test for concrete, faz uma correlação simples e direta, por meio de uma tabela, entre a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e a resistência à compressão do concreto analisado.

É importante ressaltar que o aparelho de ultra-som, fornece apenas o tempo de propagação da onda ultra-sônica que passa pela peça ou elemento de concreto em análise. A velocidade é calculada e a resistência é estimada, correlacionando com a velocidade de propagação.

4.3.6 – Estudos Relevantes da Utilização de Resíduo de Granitos

Cerca de 30% dos blocos de granito se transformam em resíduos de diversas formas. Diante desta significativa perda, e de olho em um nicho de mercado que se torna cada vez mais necessário e, possivelmente, lucrativo, alguns pesquisadores têm estudado seu emprego nos processos produtivos utilizados na construção civil. Por exemplo, na produção de argamassa (CALMON, et al., 1997), tijolos cerâmicos (NEVES, et al., 1999), peças cerâmicas (LIMA FILHO, et al., 2000) e concretos (GONÇALVES, 2000), com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento sustentável do planeta.

A Itália, sendo um importante produtor de granitos processados e de alto padrão de acabamento, é, portanto, grande geradora de resíduo. No entanto, este país já vem utilizando este resíduo na fabricação de peças prensadas para pavimentação (GONÇALVES, 2000).

GONÇALVES (2000) estudou a utilização do resíduo do corte de granito, gerado nos teares e obteve resultados muito satisfatórios. Ele utilizou o resíduo como adição mineral nos concretos em percentuais de 10% e 20% da massa do cimento. Segundo estudos do autor, as partículas do resíduo possuíam diâmetro médio de 6,74 μm e não apresentaram propriedades pozolânicas. Porém, a adição do resíduo melhorou o desempenho do concreto, aumentando sua resistência à compressão e à tração, atuando como efeito fíler. Considerando os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, compressão diametral, absorção por imersão e absorção por sucção, o autor concluiu que 10% de adição é o percentual mais indicado para utilização do resíduo do tear, apesar da resistência à compressão axial do concreto com 20% de adição ter sido maior que o de 10%. As curvas de Abrams para concretos referentes ao estudo deste autor estão apresentadas na Figura 4.10.

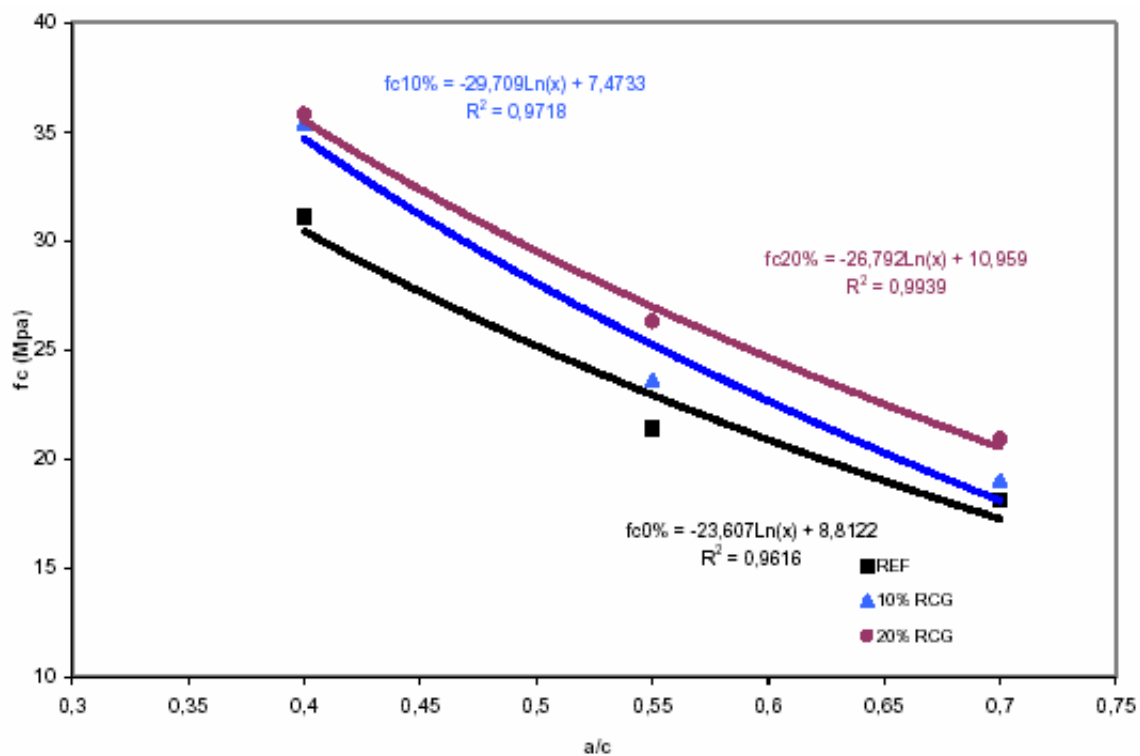


Figura 4.10 – Curvas de Abrams – utilização de resíduo de corte de granito em concretos
 Fonte: GONÇALVES, 2000

5 – MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 – Seleção de Materiais

A seleção dos materiais utilizados nos experimentos que subsidiaram este trabalho envolveu mais critérios práticos do que critérios técnicos. Houve o cuidado de se trabalhar com materiais comumente disponíveis no mercado, para que os métodos e procedimentos envolvidos no estudo não se tornassem apenas possíveis de se praticar em laboratórios bem equipados.

Por isso, todos os materiais envolvidos nos experimentos foram adquiridos em empresas de Belo Horizonte, sem envolver qualquer matéria-prima especial e difícil de ser encontrada. O único material incomum que, ainda não é encontrado nos comércios de materiais de construção é o próprio resíduo, objeto de estudo deste trabalho.

5.1.1 – Resíduo

O resíduo estudado neste trabalho é procedente de uma marmoraria de médio porte, localizada na região da Pampulha em Belo Horizonte.

Este resíduo é um pó gerado pelas empresas de beneficiamento de rochas ornamentais, especificamente, gerado no polimento de placas de granito, com o auxílio do equipamento denominado Politriz. O polimento das placas ocorre em meio aquoso e gera uma lama densa com partículas extremamente reduzidas. Após a secagem, o resíduo torna-se um pó de cor cinza, com tonalidades variadas, dependendo do tipo do granito beneficiado.

5.1.2 – Cimento

Foi utilizado neste estudo o cimento CP V – ARI, podendo conter até 5% de adição mineral. O cimento não ficou estocado por longos períodos, sendo consumido no prazo de até dois dias após sua chegada no laboratório de concreto do DEMC / UFMG. Dessa forma, procurou-se evitar perda das propriedades do cimento, por consequência de más condições de armazenamento ou vencimento do prazo de validade.

As características do cimento utilizado neste trabalho estão apresentadas na Tabela 5.1 e foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 5.1 – Características do cimento CP V – ARI, utilizado no estudo

Cimento CP V - ARI		
Massa Específica		3,07 g/cm ³
Área Superficial Específica – BET		1,450 m ² /g
Granulometria a laser	D ₁₀	1,12 µm
	D ₅₀	9,74 µm
	D ₉₀	23,40 µm
Início de Pega		80 min
Fim de Pega		245 min
<u>Resistência à Compressão (MPa)</u>		
1 dia		32,5
3 dias		41,1
7 dias		47,0
28 dias		54,7

5.1.3 – Agregado Miúdo

A areia utilizada na produção dos concretos envolvidos no estudo foi uma areia natural lavada, composta por sílica, adquirida em um comércio varejista de materiais de construção na região da Pampulha, em Belo Horizonte. O agregado possui módulo de finura igual a 2,88, composição granulométrica bem graduada, e massa específica aparente correspondente a 2,60 g/cm³.

5.1.4 – Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado nos concretos envolvidos nesta pesquisa foi uma brita de gnaíse, procedente da Mineração Santiago, extraída na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Suas principais características apresentadas foram: dimensão máxima característica igual a 19 mm e massa específica de 2,70 g/cm³.

5.2 – Métodos

Este item apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho. A coleta da amostra do resíduo, as proporções utilizadas e os ensaios destrutivos e não destrutivos realizados nos corpos de prova confeccionados para o estudo.

5.2.1 – Coleta da Amostra do Resíduo

Foram realizadas visitas a várias marmorarias na cidade de Belo Horizonte. Foram avaliadas as condições físicas, estruturais e quantidade de geração de resíduos em pequenas e médias empresas. Foi escolhida uma marmoraria de médio porte para ser a fornecedora das amostras de resíduos que foram estudadas neste trabalho. A empresa foi escolhida por possuir uma grande geração de resíduos e boa estrutura para captação adequada destes resíduos, mas o mais importante, foi a boa vontade mostrada por ela em ser parceira do projeto, mostrando-se inteiramente disposta em mudar os sistema de coleta, para

nos disponibilizar um resíduo com alto grau de pureza de granito, isento de resíduos de outras rochas. A empresa está localizada na região da Pampulha, em Belo Horizonte.

Visando avaliar a influência do resíduo, optou-se por utilizar, exclusivamente, resíduos provenientes do polimento de rocha granítica, pois caso houvesse mistura com resíduos de outras rochas, a variabilidade na composição do resíduo seria infinita e dificultaria a avaliação e sua possível utilização futura, tendo em vista que cada empresa pode gerar um resíduo com uma composição diferenciada. Pensando nisso, na etapa de amostragem do resíduo, tomou-se o cuidado de coletar uma amostra contendo somente resíduo de rocha granítica. A Figura 5.1 ilustra o tanque de armazenamento de resíduos. A Figura 5.2 mostra o tanque de armazenamento de todos resíduos finos gerados na empresa, tais como de granitos, mármore, ardósias e pedras sabão. Vale ressaltar que todos esses resíduos, geralmente, são armazenados conjuntamente.



Figura 5.1 – Caixa de armazenamento do resíduo de granito



Figura 5.2 – Tanque de armazenamento de resíduos de diversos tipos de rocha

Após a coleta, o resíduo foi encaminhado ao Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção – DEMC / UFMG, e posteriormente, seco em estufa a uma temperatura de aproximadamente 105° C até a constância de massa.

Em seguida, o material foi beneficiado em um moinho de bolas, apenas para desmanchar os torrões formados durante o processo de secagem. Para cada 6 kg de material foi utilizada uma carga de 12 bolas de porcelana, com tempo de moagem de 20 minutos na velocidade máxima do equipamento.

Após o destorroamento no moinho, o material foi peneirado na peneira de 1,19 mm para retirada de algumas impurezas grosseiras, tais como, feraspas de madeira, grãos grandes de granito que se destacaram, entre outras impurezas adquiridas durante o polimento das placas de granito, o transporte e o armazenamento do resíduo no tanque.

Após o peneiramento, o resíduo foi acondicionado em sacos plásticos bastante resistentes de 30 kg cada, e armazenados em local fresco e protegido do sol e da umidade até o momento de sua utilização.

5.2.2 – Ensaios de Caracterização do Resíduo

Para se conhecer as características físicas e químicas de um determinado material, são necessários alguns ensaios de caracterização. Cada ensaio é específico de uma determinada característica. Para se ter um conhecimento satisfatório das características do resíduo em estudo, submeteu-se o mesmo à uma série de ensaios de caracterização, tais como:

- Granulometria a Laser;
- Área Superficial Específica por Adsorção Gasosa – BET;
- Densidade por Picnometria a He;
- Espectrometria de Fluorescência de Raios-X;
- Composição Química;
- Difração de Raios-X;
- Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV;
- Determinação de Atividade Pozolânica – Método Físico;
- Determinação de Atividade Pozolânica – Método Químico;

5.2.2.1 – Granulometria a Laser

A análise granulométrica de um material consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem a amostra. Partículas estas, sugeridamente

representativas dos sedimentos, e que, também, são utilizadas no tratamento estatístico da informação fornecida pelo ensaio.

O ensaio foi realizado em soluções líquidas, contendo amostra do material a ser analisado em suspensão, homogeneizado com dispersante hexametáfosfato, em uma pequena quantidade (0,5%) da massa total da amostra. A solução analisada foi agitada e dispersa por um agitador, com o intuito de separar todas as partículas que se encontravam agregadas umas às outras, para não afetar o resultado das dimensões reais das partículas.

A contagem das partículas foi efetuada com o auxílio de um programa de computador, acoplado ao equipamento, em tempo real. O tempo de medida total é inferior a três minutos e a faixa de leitura do equipamento varia de 0,5 a 500 μm , o que possibilita uma leitura de partículas bastante reduzidas. Os resultados são expressos em curvas de porcentagem acumulada de partículas (%) versus diâmetro das partículas (μm) e em tabelas dos diâmetros D_{10} , D_{50} , D_{90} .

Esta análise foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, com o auxílio de um equipamento denominado granulômetro a laser, da marca CILAS, modelo 1064.

5.2.2.2 – Área Superficial Específica por Adsorção Gasosa – BET

A área superficial específica esperada para o material é bastante elevada, tendo em vista a granulometria visualmente reduzida das partículas do material.

Este ensaio é utilizado para a determinação da área superficial específica do material, do volume de poros existentes entre as partículas, do tamanho médio desses poros e, ainda, a forma das partículas presentes na amostra.

O gás nitrogênio é normalmente utilizado por possuir área conhecida de, aproximadamente, 16 Å (Angstrom). Este gás, portanto, é adsorvido pela superfície do material analisado, formando uma monocamada completa, denominada isoterma de adsorção. A retirada do nitrogênio da amostra é realizada pela aplicação de um vácuo, onde forma-se a isoterma de dessorção. Com isso, obtém-se a histerese de adsorção e dessorção das amostras, que com o auxílio de um programa de computador o equipamento calcula a área superficial específica do material em análise.

O ensaio foi realizado pelo método multiponto, onde foi utilizado o equipamento modelo NOVA – 1000, atualizado para NOVA – 1200 Versão 5.25 da QUANTACHROME.

5.2.2.3 – Densidade por Picnometria a Hélio (He)

A densidade do material é de grande importância para o estudo, pois, além de confirmar uma expectativa de densidade para rochas graníticas, é um parâmetro indispensável para a determinação da área superficial específica pelo método BET (Brunauer, Emmett e teller).

O método de picnometria consiste em determinar a densidade real do material, utilizando a amostra em estado de pó. Dessa maneira, são expostos todos os poros fechados do material no estado solto. A análise por este método não requereu nenhum beneficiamento do material, tendo em vista que o resíduo já se encontrava em estado de pó.

Um dos gases mais utilizados para intrusão no picnômetro, para determinação da densidade é o gás Hélio, devido às pequenas dimensões atômicas deste elemento, o que asseguram uma penetração entre as cavidades e poros de até 1 Å.

5.2.2.4 – Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

O método de análise química por fluorescência de raios-X é um método não-destrutivo e baseia-se na emissão de radiação característica pelos elementos químicos quando sujeitos à excitação apropriada, que no caso é provocada pela incidência de radiação proveniente de um tubo de raios-X (BRANDÃO, 2004). A energia dos raios-X incidentes relaciona-se com a diferença de energia entre os níveis envolvidos nas transições e tem valores característicos para cada elemento. Então, por comparação dentro de um banco de dados disponível no software do equipamento, identificam-se os elementos presentes nas amostras analisadas.

A espectrometria de raios-X faz a análise dos elementos através de cristais analisadores padrões com diferentes distâncias interplanares (d) que satisfazem à equação de Bragg (Equação 5.1).

$$n \times \lambda = 2 \times d \times \text{sen}\theta \quad (5.1)$$

onde:

n – ordem de difração (representado por um n° inteiro);

λ – comprimento de onda da radiação;

d – distância interplanar;

θ – complemento do ângulo de incidência.

No ensaio de fluorescência de raios-X molda-se uma pastilha composta da amostra sobre um leito de ácido bórico, e essa pastilha é submetida à análise. Porém, devido às limitações do equipamento, a análise feita é semiquantitativa, onde se consegue, por comparação, ter uma idéia da proporção dos elementos, mas não a quantidade ou proporção exata de cada um.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Raios-X do Departamento de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, utilizando um equipamento PHILIPS, modelo PW 2510 Sample Changer.

5.2.2.5 – Análise da Composição Química

O estudo de análise química foi realizado no resíduo para identificar quais os principais elementos químicos que o constituem. Para cada elemento ou grupo de elementos foi utilizada uma técnica específica, conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Técnicas de análise química do resíduo de granito.

Elementos	Metodologia
Si	Gravimetria, desidratação com ácido perclórico
Fé, Al, Mg	Digestão ácida e determinação por Espectrometria de Absorção Atômica, modo chama, equipamento AAnalyst 300 – Perkin Elmer
Na, K	Digestão ácida, em sistema fechado, por microondas, determinação por Espectrometria de Absorção Atômica, modo chama, equipamento AAnalyst 300 – Perkin Elmer
Ca, Ti	Digestão ácida, determinação por Espectrometria de Absorção Atômica, modo chama, equipamento AAnalyst 300 – Perkin Elmer ou titulometria por complexação, com EDTA
PPC	Calcinação, a 950°C, até peso constante

5.2.2.6 – Difração de Raios-X

A difração de raios-X consiste em um método analítico que se aplica à substâncias cristalinas. Já as substâncias amorfas, por não possuírem arranjos cristalinos, sua constituição não é identificada por este método.

Na análise difratométrica, realizada no resíduo em estudo, um feixe de raios-X de alta intensidade incide numa pastilha compactada da amostra. Utilizou-se o difratômetro da marca PHILIPS, modelo PW- 3710 (radiação $\text{CuK}\alpha$, corrente de 30 mA e voltagem de 40kV, varredura com passo de 0,060 e tempo de coleta de 1,0

segundo por passo). Na análise das fases cristalinas, os valores de “d” (distância interplanar) foram considerados com aproximação de $\pm 0,01 \text{ \AA}$.

Variando-se o ângulo de incidência pela rotação da amostra a uma velocidade pré-determinada, obtém-se o registro dos planos cristalográficos da amostra. Assim, conhecendo-se o comprimento de onda dos raios-X, é possível, através da equação de Bragg, determinar os valores das distâncias interplanares (d) para cada banda de difração. De posse dos picos que representam as distâncias interplanares (d), e com o apoio de recursos computacionais, que comparam essas distâncias interplanares com um banco de dados padrão, pode-se identificar as fases de minerais que estão presentes na amostra.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Raios-X do Departamento de Minas da Escola de Engenharia da UFMG.

5.2.2.7 – Microscopia Eletrônica de Varredura no Resíduo – MEV

A microscopia de varredura de feixes de elétrons não fornece apenas a imagem da amostra. Este ensaio também é capaz de fazer uma micro-análise e identificar a constituição química da amostra, através dos óxidos mais prováveis de serem formados. Nessa análise de caracterização microestrutural, um feixe de elétrons é convertido a um ponto que incide na superfície da amostra. Parte do feixe é refletida e coletada por um detector, que converte este sinal em imagem.

A microscopia possui dois tipos de detectores, sendo um de elétrons secundários e o outro de elétrons retro-espalhados.

Foi utilizado, no experimento, o detector de elétrons retro-espalhados, pois estes são gerados em maiores volumes e maiores profundidades que os elétrons secundários, sendo, portanto, responsáveis pela geração de uma imagem de média resolução. Porém, esse detector fornece um bom contraste, o que o torna mais interessante, tendo em vista a irregularidade na topografia da superfície da

amostra. O contraste depende fundamentalmente da massa específica dos elementos, da topografia e da composição química da amostra.

Com o apoio de um Espectrômetro Dispersivo em Energia (EDS – Energy Dispersive Spectrometer), acoplado ao MEV, pode ser feita uma análise da composição química dos elementos da amostra, pontualmente ou em uma área pré-determinada pela microscopia.

Neste experimento foi feita uma microanálise da composição química do material em vários pontos diferentes da amostra. Como o material analisado não condutor de eletricidade, a amostra foi preparada, aplicando-se a ela, uma finíssima camada condutora, de ouro, sobre toda sua superfície.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica da Escola de Engenharia da UFMG.

5.2.2.8 – Determinação de Atividade Pozolânica – Método Físico

Para verificar se o material em estudo possui características pozolânicas foi realizado o ensaio de pozolanicidade, de acordo com a Norma Brasileira NBR 5752 (1992) – Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento.

Foram moldados três corpos de prova de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, com argamassa padrão, utilizando agregados de granulometrias padronizadas, de acordo com a Norma NBR 7214 (1992) – Areia normal para ensaio de cimento – e cimento CP V.

Em seguida foram moldados outros três corpos de prova de mesmas dimensões, com os mesmos agregados padronizados. Porém, foram substituídos 35% do volume do cimento utilizado pelo resíduo de polimento de granito, material este com expectativa de apresentar algum efeito pozolânico.

Após 24 h, os CP's foram retirados da forma e armazenados em recipientes hermeticamente fechados e permaneceram em cura a uma temperatura de $(38 \pm 2) ^\circ\text{C}$ até a data de ruptura (28 dias).

Aos 28 dias, os corpos de prova foram capeados e submetidos ao ensaio de compressão axial para determinação de suas resistências mecânicas. A resistência média dos corpos de prova da argamassa padrão foi comparada com a resistência média dos corpos de prova da argamassa com presença do resíduo. Para que o material em análise seja considerado pozolânico, é necessário que a resistência média destes corpos de prova seja maior ou igual à 75% da resistência média daqueles com argamassa padrão.

As quantidades de água necessárias para produzir argamassas com índice de consistência de (225 ± 5) mm, de acordo com o estabelecido pela NBR 5752 (1992), foram determinados conforme a NBR 7215 (1996) – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção – DEMC / UFMG.

5.2.2.9 – Determinação de Atividade Pozolânica – Método Químico

Foi realizado, também, o ensaio para determinação de atividade pozolânica pelo método químico. Este método consiste em relacionar o teor de óxido de cálcio na solução, com a alcalinidade total da solução em contato com a pasta de cimento. Neste método a atividade pozolânica é avaliada comparando a quantidade Ca(OH)_2 presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado, com a quantidade de Ca(OH)_2 que poderia saturar um meio de mesma alcalinidade. O material analisado pode ou não reagir com a solução utilizada no ensaio. De acordo com as reações ocorridas na mistura e com o auxílio de uma isoterma de solubilidade de Ca(OH)_2 , determina-se, portanto, se o material é ou não pozolânico.

O ensaio foi realizado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, em São Paulo, de acordo com a NBR 5753 (1992) – Cimento Portland pozolânico – Determinação da pozolanicidade.

5.2.3 – Caracterização dos Agregados Envolvidos nos Experimentos

Os agregados gráudo e miúdo, utilizados nos concretos envolvidos neste estudo, foram caracterizados no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção – DEMC / UFMG.

5.2.3.1 – Agregado Miúdo

A caracterização da areia envolveu os seguintes ensaios:

- Granulometria, de acordo com a norma NBR NM 248 (2003) – Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- Massa unitária, de acordo com a norma NBR NM 45 (2006) – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios;
- Massa específica, de acordo com a norma NBR NM 52 (2006) – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente;
- Torrões de argila, de acordo com a norma NBR NM 44 (2006) – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis;
- Materiais pulverulentos, de acordo com a norma NBR NM 46 (2006) – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem.

5.2.3.2 – Agregado Graúdo

A caracterização do agregado gráudo, utilizado nos concretos preparados e avaliados neste estudo, envolveu os seguintes ensaios:

- Granulometria, de acordo com a norma NBR NM 248 (2003) – Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- Massa unitária, de acordo com a norma NBR NM 45 (2006) – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios;
- Massa específica, de acordo com a norma NBR NM 53 (2006) – Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água;
- Torrões de argila, de acordo com a norma NBR NM 44 (2006) – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.

5.2.4 – Dosagem dos Concretos

Após os ensaios de caracterização do resíduo e dos materiais empregados nos concretos, foram definidos os traços a serem utilizados nos concretos.

Os traços dos concretos avaliados no estudo foram obtidos de acordo com o método de dosagem do ACI (MEHTA E MONTEIRO, 1994). Foram estabelecidos três fatores água/cimento (a/c) de 0,45, 0,55 e 0,65 e, com base na resistência dos cimentos aos 28 dias, para cada fator a/c , foram calculados os traços e os consumos de cada material por metro cúbico de concreto adensado.

Para cada uma das três relações a/c , o pó de granito foi adicionado aos concretos nas proporções de 10% e 20% da massa do cimento, sem nenhuma alteração nas proporções dos outros materiais. Este procedimento foi adotado para que a única variável fosse o percentual de adição mineral contida nos concretos. Isto facilita a avaliação da influência da adição mineral no desempenho final dos concretos analisados.

Vale ressaltar que, neste trabalho, não foi adicionado qualquer tipo de aditivo químico, visando avaliar somente a influência da adição mineral (pó de granito) nas propriedades dos concretos.

O abatimento de tronco de cone (slump) não foi tomado como referência em nenhum momento, ou seja, não se teve nenhuma preocupação em mantê-lo constante enquanto se variava o percentual de adição mineral. Porém, os cálculos dos traços foram desenvolvidos de forma a se obter abatimentos para obter concretos com boa trabalhabilidade, e com a possibilidade de poderem ser bombeáveis ou auto-adensáveis. Como a única variável nos concretos é o percentual de adição mineral, espera-se que o abatimento de tronco de cone diminua gradativamente à medida que se aumenta o percentual de adição de resíduo.

5.2.5 – Moldagem e Cura dos Corpos de Prova de Concreto

Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para cada traço de concreto, para serem submetidos aos ensaios de compressão axial avaliada nas idades de 7 e 28 dias. O adensamento foi realizado com a utilização de uma haste de adensamento, em duas camadas e doze golpes em cada uma. Como são nove traços diferentes, foram moldados um total de 54 corpos de prova com essas dimensões.

Foram moldados, também, 2 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura para cada traço de concreto. O adensamento foi realizado com a utilização de uma haste de adensamento, em três camadas e vinte e cinco golpes em cada uma. Foram moldados um total de 18 corpos de prova para serem submetidos ao ensaio de permeabilidade à água sob pressão.

Após moldagem, os corpos de prova foram mantidos à sombra por 24 horas e, após este período, foram removidos da forma e mantidos em câmara úmida até a data dos ensaios. A moldagem e a cura dos corpos-de-prova foram realizadas de

acordo com a NBR 5738 (2003) – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos.

A influência dos resíduos nos parâmetros de trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi avaliada pela medida de sua consistência, através da norma NBR 7223 (1992) – Concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

5.2.6 – Ensaios Físicos nos Concretos Endurecidos

5.2.6.1 – Ultra-sonografia

Os ensaios não destrutivos, em especial a ultra-sonografia, têm como principal finalidade averiguar e determinar a qualidade e homogeneidade de uma estrutura ou de um elemento de concreto, constituindo-se foco de pesquisa e análise no mundo inteiro, pela vantagem de possibilitar a realização de ensaios, com resultados satisfatórios, sem qualquer prejuízo para a estrutura analisada.

A ultra-sonografia é, portanto, muito útil no diagnóstico de estruturas, pois permite realizar um acompanhamento das características do material ao longo de sua vida útil. Através da análise dos dados obtidos nestes ensaios, pode-se averiguar a uniformidade do concreto, controlar sua qualidade, acompanhar sua deterioração e, por comparação com corpos de prova de referência, pode-se, até mesmo, estimar sua resistência mecânica.

Os ensaios ultra-sônicos foram realizados segundo a norma britânica BSI 1881, parte 206 – Ultrasonic Test for Concrete, usando um equipamento PUNDIT (Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Test), equipado com transdutores de 54 kHz de frequência, utilizando sistema direto de medição.

O ensaio ultra-sônico foi realizado nos corpos de prova momentos antes destes serem submetidos ao ensaio de compressão axial. Isto é possível, devido à ultra-

sonografia ser um ensaio não destrutivo e não provocar nenhum dano à estrutura dos corpos de prova, não interferindo, portanto, nos resultados de resistência mecânica.

Após ser feita a calibragem do equipamento (utilizando uma barra padronizada como referência) os transdutores foram posicionados nas faces opostas dos corpos de prova, que estavam sobre uma bancada, realizando-se, então, uma transmissão direta (transdutores posicionados frontalmente) da onda ultra-sônica, conforme apresentado na Figura 5.3.



Figura 5.3 – Ensaio de ultra-sonografia, com transmissão direta
Fonte: AGUIAR, 2006

Foram feitas três medições em cada corpo de prova e considerada a média das três leituras para a velocidade de propagação da onda.

Os tempos dos pulsos longitudinais, gerados pela onda ultra-sônica, foram obtidos diretamente no visor do aparelho, apresentados com a unidade de micro

segundos (μs). A velocidade de propagação da onda, V , foi obtida pela Equação 5.2.

$$V = L / t \quad (5.2)$$

onde:

V = velocidade de propagação da onda ultra-sônica (km/s)

L = comprimento da amostra (mm)

t = tempo ($\mu\text{s} = 10^{-6}$ s)

A estimativa da resistência mecânica a partir do ensaio de ultra-sonografia foi feita com base na norma britânica BSI 1881, Parte 206, por uma tabela que correlaciona de forma simples e direta, a velocidade de propagação da onda ultra-sônica com a resistência à compressão do concreto analisado.

5.2.6.2 – Permeabilidade à Água sob Pressão

A permeabilidade de um concreto, ou de um material qualquer, se caracteriza pela capacidade de percolação de um fluido em sua massa, em uma unidade de área por unidade de espessura, quando este fluido é submetido a uma determinada pressão.

O fluxo de água que percola em um concreto é fortemente influenciado pelos poros capilares da pasta de cimento, causados, sobretudo, pelo fator água/cimento, pelo nível de hidratação do cimento, pelos agregados utilizados, pelo método de adensamento e pelo processo de cura daquele concreto.

Para executar o ensaio de permeabilidade à água sob pressão, foi utilizado um permeabilímetro da German Instrument, capaz de efetuar a medição em peças

com áreas relativamente grandes, por exemplo, em corpos de prova cilíndricos de diâmetros iguais ou superiores a 15 cm.

Para atender às exigências de dimensões do equipamento, foram confeccionados corpos de prova com dimensões de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, exclusivamente para a realização dos ensaios de permeabilidade.

A permeabilidade nos corpos de prova foi avaliada medindo-se os índices de permeabilidade no topo, no meio e na base do elemento. Para isso, todos os corpos de prova foram serrados em pastilhas cilíndricas de 15 cm de diâmetro e 3 cm de espessura, sendo extraídas, de cada um, uma pastilha do topo, outra do meio e outra da base do corpo de prova. Para evitar influências da segregação e da exsudação nos resultados, as pastilhas da base e do topo dos CP's foram retiradas a partir de 1 cm das extremidades dos elementos.

Após a serragem, as pastilhas foram expostas ao ar, na sombra, para secagem das suas superfícies. Após a secagem, passou-se para a execução do ensaio. Em uma base metálica, com dois alicates de pressão, o instrumento de medição (com um reservatório de água) foi pressionado contra a pastilha a ser ensaiada, com um anel de neoprene entre eles, capaz de selar o contato entre o equipamento e a pastilha de concreto, e evitar a perda de pressão durante o contato, conforme Figura 5.4. Em seguida, enrosca-se a tampa com o reservatório superior, que possui uma válvula e uma graduação em milímetros. Adiciona-se água no equipamento, fecha-se a válvula do reservatório, e ao enroscar a tampa, o aparelho vai aplicando pressão gradativamente sobre a pastilha até alcançar uma pressão no sistema de 0,4 Bar no sistema, conforme Figuras 5.5 e 5.6. A perda da pressão indica que a água está percolando pela pastilha. Ao perceber qualquer diminuição da pressão, ajusta-se o mecanismo de rosca, a fim de manter uma pressão constante no sistema de 0,4 Bar. Mantendo-se a pressão constante, faz-se a leitura (em mm), no reservatório graduado, a cada minuto e anotam-se valores.



Figura 5.4 – Permeabilímetro preso à pastilha por dois alicates de pressão

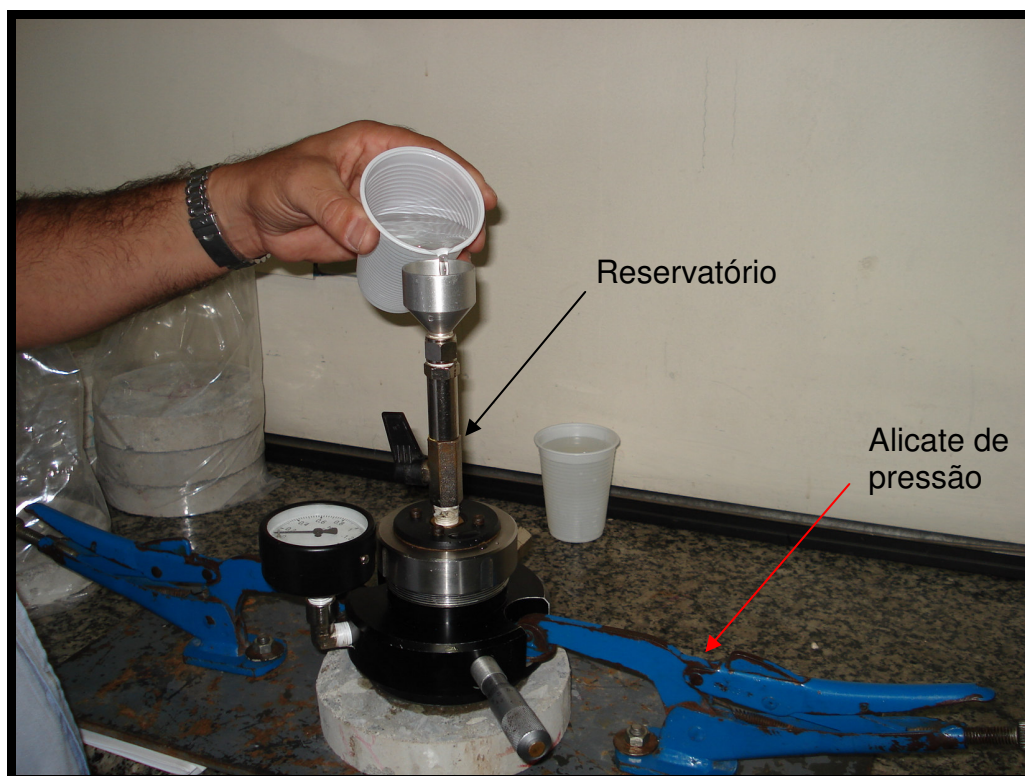


Figura 5.5 – Pêndulo enroscado e água sendo adicionada no sistema.



Figura 5.6 – Manômetro indicando pressão no sistema igual a 0,4 Bar

O fluxo de água que passa pela pastilha de concreto foi calculado pela vazão de água, ou seja, volume de água que passa pela área da superfície do elemento de concreto num determinado intervalo de tempo. Este fluxo foi obtido através da Equação 5.3.

$$q = 78,6 \times (g1 - g2) / 3018 \times t \quad (5.3)$$

onde:

q = Fluxo (mm/s)

$g1, g2$ = Leitura no micrômetro (mm)

t = Intervalo de tempo entre leituras (s)

5.2.6.3 – Compressão Axial

O ensaio de compressão axial é um ensaio destrutivo e tem o objetivo de avaliar a resistência à compressão suportada pelo concreto a ser avaliado. Vale ressaltar que os critérios de mistura e moldagem influenciam fortemente o resultado, visto que, se o concreto não estiver homogêneo ou a moldagem e adensamento não forem realizados adequadamente, provavelmente, a massa dos corpos de prova também não será homogênea e compacta, contendo nichos que comprometem a resistência do elemento a ser avaliado.

Neste estudo foram ensaiados 3 corpos de prova para cada traço de concreto produzido, sendo 27 elementos ensaiados aos 7 dias de idade e 27 elementos aos 28 dias, num total de 54 corpos de prova, submetidos ao rompimento por compressão axial.

Os corpos de prova ensaiados não sofreram capeamento com enxofre no topo e na base. Foram utilizados discos de neoprene de alta densidade, confinados em um aro metálico, conforme Figura 5.7, para regularização das superfícies da base e do topo dos corpos de prova, para distribuição uniforme da carga na área circular do elemento ensaiado. Os discos de neoprene são inseridos diretamente na prensa, um sob e outro sobre o corpo de prova no momento do ensaio, conforme Figura 5.8. O equipamento utilizado foi uma prensa EMIC PC 200 com capacidade de carga de 200 t.f, mostrada na Figura 5.9.



Figura 5.7 – Disco de neoprene – substitui capeamento com enxofre



Figura 5.8 – Regularização de face com disco de neoprene



Figura 5.9 – Prensa Hidráulica de 200 t.f de capacidade

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Metálicos do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção – DEMC/UFMG, segundo as recomendações da norma NBR 5739 (1994) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto.

5.2.6.4 – Porosidade dos Concretos

A porosimetria por intrusão de mercúrio consiste em determinar as dimensões de poros contidos em um material, injetando-se mercúrio sob uma variação crescente de pressão na amostra, a qual fica submetida a um vácuo. À medida que aumenta-se a pressão, mede-se o volume do mercúrio que penetra na amostra, de acordo com a equação de Washburn (SATO *et al*, 2001) (Equação 5.4).

$$D = - 4\gamma .\cos\theta / P \quad (5.4)$$

onde:

D = diâmetro do poro, em μm ;

γ = tensão superficial do líquido, igual a 485.10^{-3} N/cm;

θ = ângulo de contato entre o líquido e a superfície, fixado em $140,5^\circ$;

P = pressão hidrostática da coluna de mercúrio na cápsula da amostra, em Pa.

O ensaio foi realizado em amostras retiradas dos corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão axial na idade de 28 dias. Estas amostras, constituídas das argamassas dos concretos, foram extraídas dos interiores dos corpos de prova após sua ruptura. As amostras foram submetidas a um aquecimento, em estufa, durante 72 horas a uma temperatura constante de 100°C , para eliminar toda umidade e evitar interferência nos valores de porosidade.

Foram submetidas ao ensaio de porosidade, amostras com adições de resíduos de 0% e 20% dos concretos com relação a/c de 0,65 e 0,45, totalizando 4 tipos diferentes de amostras ensaiadas.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Minas da Escola de Engenharia da UFMG, utilizando um equipamento da MICROMERITCS, modelo AutoPore III 9420. Este equipamento é ideal para medir poros com diâmetros maiores que 50 nm. A distribuição dos poros presentes na amostra é obtida pela relação entre o diâmetro do poro e o volume de mercúrio injetado durante o ensaio.

5.2.6.5 – Análise dos Concretos no Microscópio Eletrônico de Varredura

A análise dos concretos pelo microscópio de varredura de feixes de elétrons é capaz de fornecer, além da imagem, uma micro-análise da amostra e identificar sua constituição química.

Foram ensaiadas amostras dos corpos de prova submetidos à compressão axial com idade de 28 dias. Estas amostras, constituídas das argamassas dos concretos, foram extraídas do interior dos corpos de prova, após ruptura à compressão.

O ensaio foi realizado em amostras dos concretos com fatores a/c de 0,65 e 0,45, com 0% e 20% de adição de resíduo para cada um dos concretos.

Foi utilizado um detector de elétrons retro-espalhados, capaz de gerar uma imagem de média resolução o qual fornece um bom contraste, evidenciando as irregularidades na topografia da superfície da amostra. Este contraste depende fundamentalmente da massa específica dos elementos, da topografia e da composição química da amostra.

Com o apoio de um Espectrômetro Dispersivo em Energia (EDS – Energy Dispersive Spectrometer), acoplado ao MEV, foi feita uma análise da composição química dos elementos, pontualmente, em diversos pontos da amostra,

identificando os elementos mais prováveis de serem formados. Como a amostra ensaiada é de um material não condutor, foi aplicada a ela, uma finíssima camada condutora, composta de ouro, sobre toda sua superfície.

6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 – Caracterização do Resíduo

6.1.1 – Granulometria a Laser

O resultado do ensaio de granulometria a laser apresentou os diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} , representando que, respectivamente, 10%, 50% e 90% do total da massa do material analisado possuem grãos com diâmetros abaixo dos valores indicados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} da amostra de resíduo de granito.

Amostra	D_{10} μm	D_{50} μm	D_{90} μm
Resíduo de Polimento de Granito	1,81	12,11	39,17

O ensaio mostrou que o material é bastante fino, sendo que 90% da massa total da amostra possui grãos com diâmetros inferiores a 39,17 μm e com 50% da amostra possuindo grãos com diâmetros inferiores a 12,11 μm . Estas dimensões de partículas, conferem ao resíduo, condições de atuar como adições minerais. Esta granulometria é similar à do cimento utilizado nos concretos, que possui D_{50} de 9,74 μm , conforme apresentado na Tabela 5.1. A Figura 6.1 mostra a curva de distribuição granulométrica do resíduo.

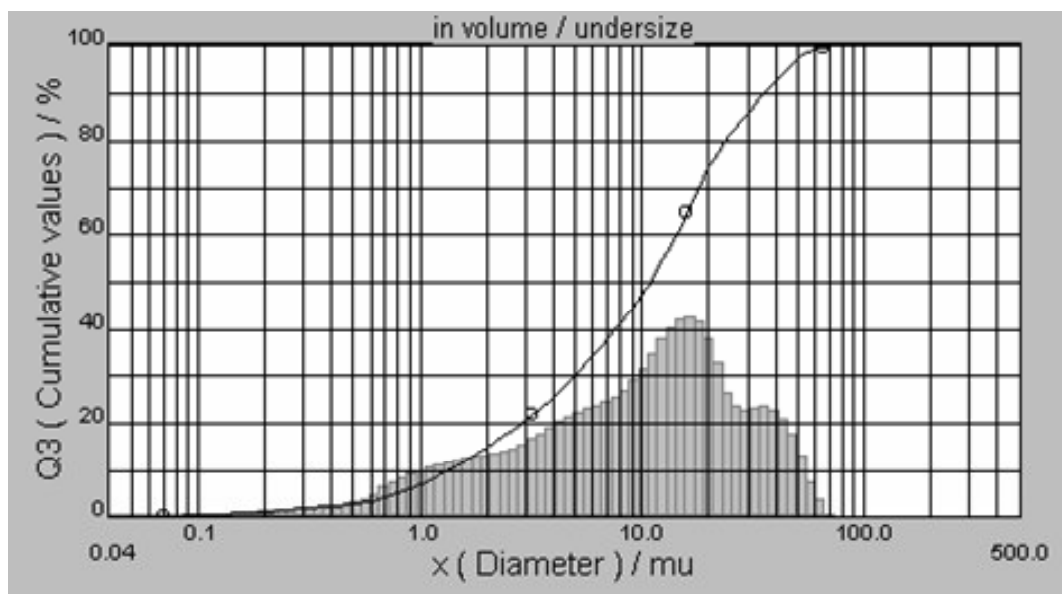


Figura 6.1 – Curva da distribuição granulométrica do resíduo

Observando a Figura 6.1 pode-se dizer que o agregado possui uma granulometria bem graduada, possuindo uma variação no tamanho das partículas, principalmente, entre 0,40 e 60,00 μm , com uma distribuição bem uniforme dessas partículas.

6.1.2 – Área Superficial Específica por Adsorção Gasosa – BET

A partir dos dados de inclinação e intercepto do gráfico gerado pelo método Multiponto, juntamente com o número de Avogadro, massa molecular do adsorvato (nitrogênio – gás utilizado no experimento), área projetada da molécula do adsorvato, massa da amostra e à temperatura de 77 K, obteve-se uma área superficial específica de 2,284 m^2/g para a amostra.

O resultado apresentou uma área superficial específica bastante elevada, conforme era esperado, tendo em vista a granulometria reduzida das partículas. Porém, apresentou uma superfície específica bem superior à do cimento utilizado nos concretos, que é de 1,450 m^2/g , de acordo com a Tabela 5.1. Este resultado pode ser explicado pelo fato das partículas do resíduo sofrerem quebras durante o desgaste da rocha e se tornarem partículas com superfícies bastante irregulares e rugosas se comparadas às partículas do cimento que possuem uma morfologia

esférica causadas pelo forno rotativo. Essa irregularidade na forma das partículas do resíduo provoca o aumento da área superficial.

6.1.3 – Densidade por Picnometria a Hélio (He)

O resultado do ensaio de densidade por picnometria a Hélio apresentou uma densidade de 2,72 g/cm³ para o resíduo de granito. O resultado confirmou o valor já esperado para rochas graníticas, as quais possuem densidades em torno de 2,70 g/cm³

6.1.4 – Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

O método de análise química por espectrometria de fluorescência de raios-X, determina os principais elementos químicos que compõem a amostra analisada, conforme apresentado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Principais elementos presente na amostra de resíduo

Presença de Elementos	Elementos
Alta	Si, Al, O
Média	Fe, Ca, K, Mg, Na
Baixa	Ti, P
Traço	Cl, S, Mn, Ni, Co, Cr, Ba, Zr, Pb

Como a análise feita foi uma análise semiquantitativa, obteve-se, por meio de comparação, uma idéia aproximada da proporção dos elementos presentes na amostra, mas não a quantidade ou proporção exata de cada um. Com isso, o ensaio apresentou os principais elementos em percentuais altos, médios, baixos e traços.

O resultado do ensaio apresentou, quanto à constituição química da amostra, os mesmos elementos comumente encontrados em amostras de outros granitos. Os principais elementos químicos encontrados na amostra foram Silício (Si), Alumínio (Al) e Oxigênio (O), estes, encontrados em altos percentuais.

6.1.5 – Composição Química

A análise química do resíduo apresenta os elementos que o constituem na forma de óxidos. Os resultados apresentados na Tabela 6.3 confirmam os resultados obtidos no ensaio anterior e indicam que o somatório dos percentuais dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 , e Fe_2O_3 , resulta num valor acima de 50%, valor mínimo proposto pela NBR 12.653 (1992) – Materiais pozolânicos, para que um material seja considerado como pozolana classe E.

Tabela 6.3 – Composição química do pó de granito.

Óxidos	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	Na_2O	PPC
%	51,250	30,600	4,480	3,550	2,020	0,887	0,773	0,002	6,38

6.1.6 – Difração de Raios-X

A difração de raios-X mostrou a composição mineralógica da amostra, ou seja, a partir deste resultado é possível fazer uma análise mineralógica do resíduo, e compreender melhor os arranjos das partículas que o constituem, que por antecedência, constituem os granitos que o originaram. O difratograma do resíduo está apresentado na Figura 6.2.

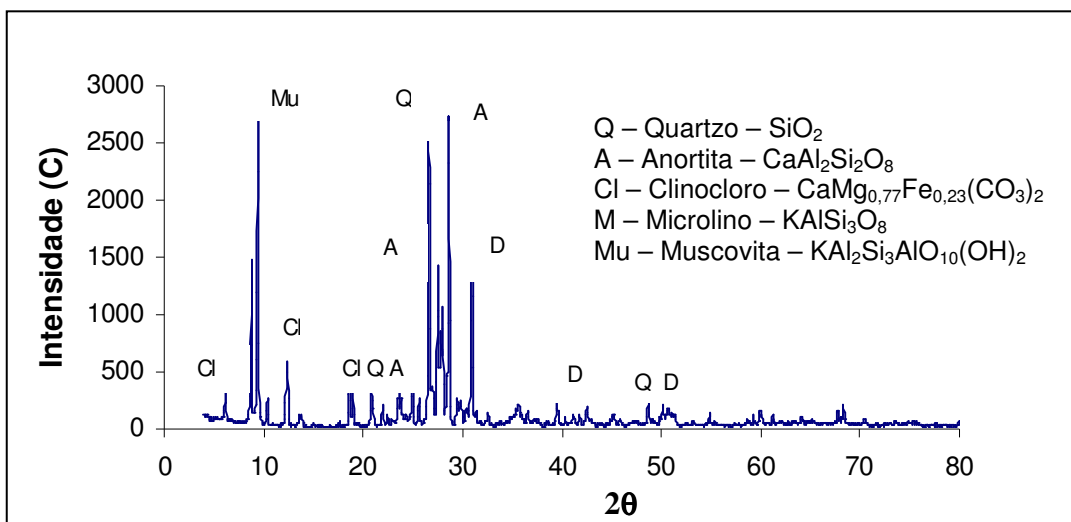


Figura 6.2 – Espectro de difratometria de raios-X da amostra de resíduo de granito

A partir do espectro de difratometria de raios-X apresentado na Figura 6.2, observa-se a presença de picos bem definidos de minerais como o Quartzo, Anortita, Muscovita, entre outros. Esses picos indicam a presença de fases cristalinas na amostra, sendo, portanto, possível dizer que o material que gerou o resíduo é um material constituído de cristais bem definidos, tendo em vista que os granitos são provenientes de rochas magmáticas cristalinas. A ausência do domo de amortização no espectro pode ser um indicador da baixa reatividade potencial do material.

6.1.7 – Análise do Resíduo pelo Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV

A partir da análise realizada pelo microscópio eletrônico de varredura foi possível observar a morfologia das partículas do resíduo, com o auxílio de fotomicrografias capturadas na superfície da amostra. A amostra não foi submetida a nenhum processo de beneficiamento, sendo, portanto, analisada na forma de pó.

As fotomicrografias foram capturadas com um aumento de 200 vezes e estão apresentadas nas Figuras 6.3 e 6.4.

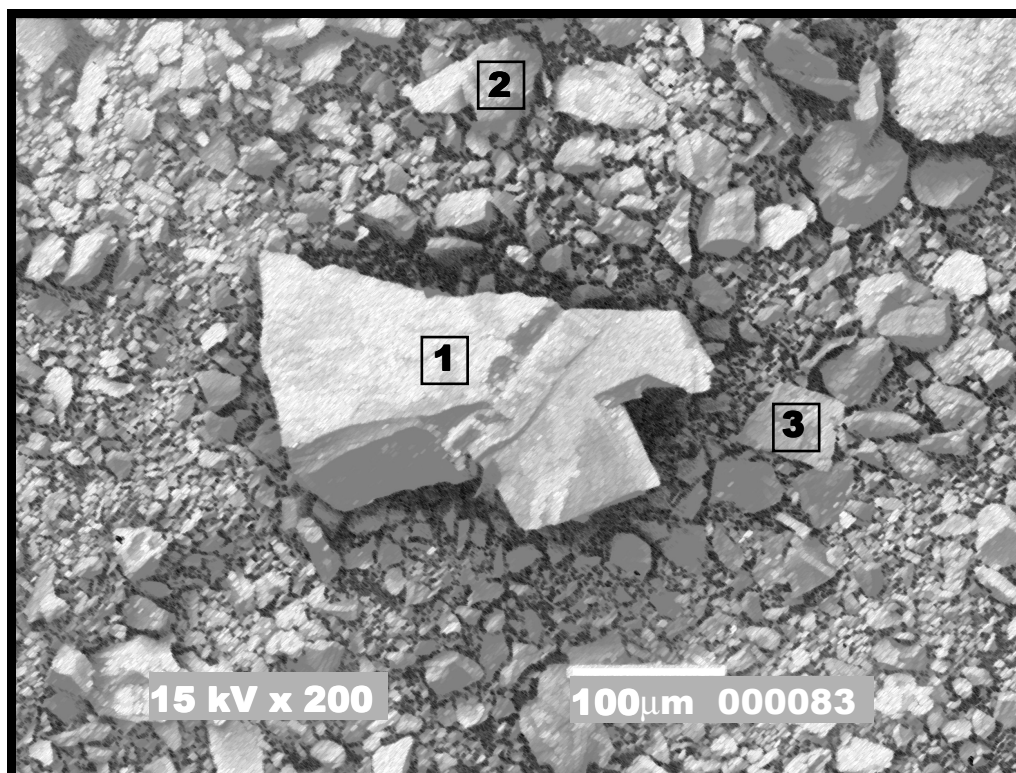


Figura 6.3 – Fotomicrografia da amostra – aumento de 200x

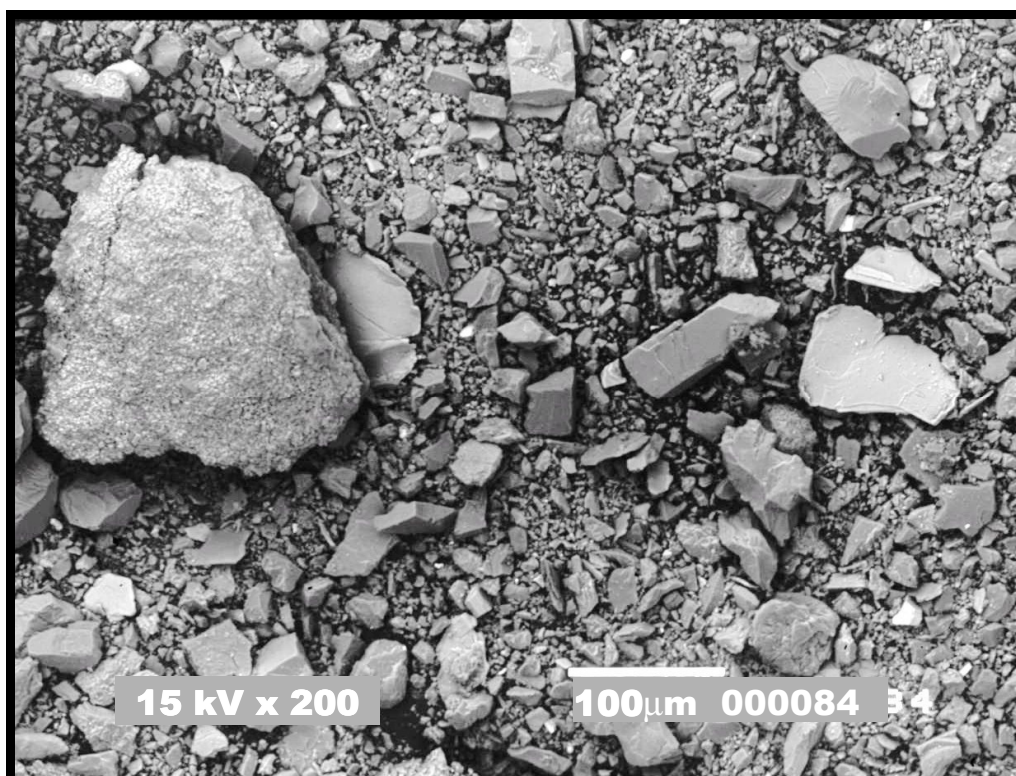


Figura 6.4 – Fotomicrografia da amostra – aumento de 200x

Observando as imagens da figura 6.3, foi possível perceber que o material possui uma granulometria bem graduada, ou seja, possui partículas de tamanhos bastante variados, sendo possível observar grãos de dimensões acima de 100 μm e grãos de dimensões próximas de 1 μm . A variação no tamanho dos grãos é marcante na imagem, sendo observados grãos de todas as dimensões muito bem distribuídos ao longo da amostra, e a grande maioria das partículas possui, visualmente, dimensão inferior a 40 μm , estando, portando, de acordo com o resultado de granulometria a laser apresentado no item 6.1.1.

Outra observação importante é a forma das partículas do resíduo. Estas se apresentam bastante irregulares, sem apresentar nenhuma tendência para formas essencialmente cúbicas ou para formas essencialmente lamelares. A geometria irregular está relacionada ao desgaste e quebra dos grãos minerais da rocha granítica durante o processo de polimento.

Foram realizadas análises químicas em três áreas da amostra, áreas 1, 2 e 3, conforme apresentado na Figura 6.3. As Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 apresentam as composições químicas das áreas 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 6.4 – Principais elementos presentes na área 1 da Figura 6.3

Óxido	Percentual (%)
Na ₂ O	3,24
MgO	3,09
Al ₂ O ₃	18,01
SiO ₂	57,31
K ₂ O	0,86
Fe ₂ O ₃	12,13

Tabela 6.5 – Principais elementos presentes na área 2 da Figura 6.3

Óxido	Percentual (%)
Na ₂ O	0,37
Al ₂ O ₃	18,44
SiO ₂	66,94
K ₂ O	14,25

Tabela 6.6 – Principais elementos presentes na área 3 da Figura 6.3

Óxido	Percentual (%)
Na ₂ O	0,75
MgO	2,87
Al ₂ O ₃	14,42
SiO ₂	58,46
K ₂ O	12,32
Fe ₂ O ₃	11,18

Os percentuais de óxidos presentes na amostra, apresentados nas Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6, apontam coerência com os elementos mais abundantes no resíduo, apresentados pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X, mostrado na Tabela 6.2 e pelo ensaio de difração de raios-X, mostrado nas fases da Figura 6.2 . De acordo com a Tabela 6.2, os elementos mais abundantes são: o Silício (Si), o Alumínio (Al) e o Oxigênio (O), os mesmos apresentados em maiores percentuais, na forma de óxidos, pelas Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6.

6.1.8 – Determinação de Atividade Pozolânica – Método Físico

Os resultados de resistências mecânicas dos corpos de prova submetidos à compressão axial aos 28 dias de idade, para determinação da atividade pozolânica, estão apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Ensaio de determinação de atividade pozolânica – método das argamassas

Argamassa	Água Requerida (%)	Consistência (mm)	a/c	Resistência Média à Compressão Axial (MPa)	Índice de Atividade Pozolânica (%)
35% resíduo + 65% cimento (em volume)	102	225	0,53	22,0	60,4
Referência 100% cimento	100	220	0,50	36,4	100,0
Especificações NBR 12653	<110	225 ± 5	-	-	Mínimo 75

Para que o material seja considerado pozolânico, deve possuir um índice de pozolanidade igual ou superior a 75%, ou seja, a média das resistências da argamassa constituída de 35% de resíduo e 65% cimento (em volume) deve ter valor superior a 75% do valor médio das resistências da argamassa padrão, constituída apenas de cimento Portland. A argamassa com resíduo apresentou resistência média de 22,0 MPa, enquanto que a argamassa padrão apresentou média de resistência de 36,4 MPa, o que confere um índice de pozolanidade 60,4%, índice este, inferior ao estabelecido pela NBR 5752 (ABNT, 1992), indicando, portanto, que o resíduo não possui atividade pozolânica, quando avaliado pelo método físico.

6.1.9 – Determinação de Atividade Pozolânica – Método Químico

O ensaio para determinação de atividade pozolânica, realizado pelo método químico, confirmou que o resíduo não é um material pozolânico, corroborando com os resultados obtidos no ensaio de atividade pozolânica, pelo método das argamassas (método físico), apresentado no item 6.1.8. Os dois resultados foram

coerentes e proporcionaram maior confiabilidade de que, com esta granulometria, o resíduo possui uma estrutura cristalina, apresentada pela difração de raios-X, não sendo, portanto, um material pozolânico. Isto, porém, não significa que a adição do resíduo não seja capaz de melhorar o desempenho de concretos, tendo em vista que é possível sua atuação como efeito fíler ou material cimentante.

As reações ocorridas na solução, contendo amostra do resíduo, utilizada no ensaio não foram suficientes para que o material fosse considerado pozolânico, pois obteve-se um elevado teor de cálcio após um determinado período de possíveis reações, ocasionando uma alcalinidade suficientemente elevada, de modo que a plotagem do resultado do ensaio no gráfico, “teor de óxido de cálcio na solução em contato com a pasta de cimento versus a alcalinidade total da solução em contato com a pasta de cimento” (Figura 6.5), ficasse acima da isoterma de solubilidade, indicando que o material não é pozolânico.

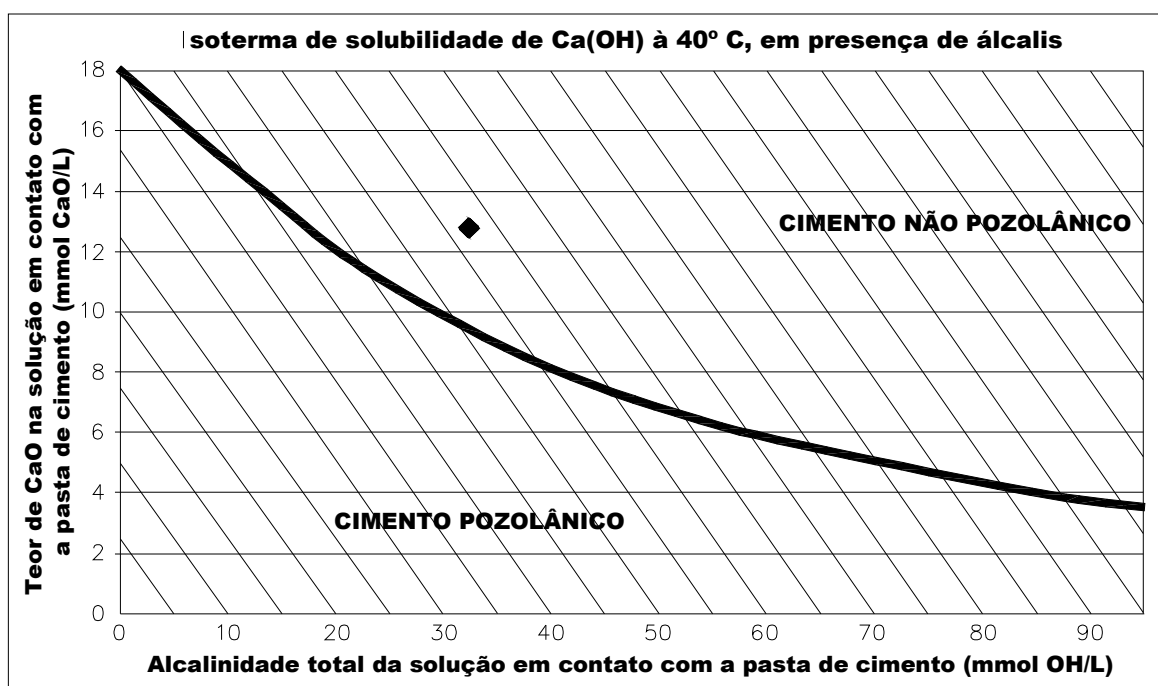


Figura 6.5 – Resultado do ensaio de atividade pozolânica – método químico

6.2 – Caracterização dos Agregados

6.2.1 – Agregado Miúdo

A caracterização da areia utilizada nos concretos envolvidos neste estudo pode ser verificada na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Caracterização do agregado miúdo utilizado no estudo

Agregado Miúdo	
Areia lavada	
Módulo de finura (NBR NM 248)	2,88
Massa unitária (NBR NM 45)	1,29 g/cm ³
Massa específica (NBR NM 52)	2,60 g/cm ³
Torrões de argila (NBR NM 44)	Sem presença
Material fino passante através da peneira 75µm (NBR NM 46)	1,04 %

A areia utilizada possui uma distribuição granulométrica bem graduada, com um percentual de finos bastante reduzido, fator importante na fabricação de concretos, pois um alto percentual de materiais argilosos proporciona um grande consumo de água e, conseqüentemente, maior consumo de cimento, o que aumenta significativamente os custos de produção de concretos. Esta pureza do agregado é um fator importante para o bom desempenho de concretos.

6.2.2 – Agregado Graúdo

As características da brita utilizada nos concretos envolvidos neste estudo está apresentada na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Caracterização do agregado graúdo utilizado no estudo

Agregado Graúdo	
Brita Gnaisse	
Módulo de finura (NBR NM 248)	6,94
Dimensão Máxima Característica (NBR NM 248)	19 mm
Massa unitária (NBR NM 45)	1,38 g/cm ³
Massa específica (NBR NM 52)	2,70 g/cm ³
Torrões de argila (NBR NM 44)	Sem presença

O agregado utilizado no estudo é proveniente de rochas gnáissicas e possui formas bastante irregulares, sem nenhuma predominância marcante de formas cúbicas ou lamelares, além de ser um material bastante limpo, com pouca presença de partículas finas na forma de pó. O material é, também, totalmente isento de presença de argilas na forma de torrões.

É importante ressaltar que as dimensões dos grãos do agregado são compatíveis com as dimensões das formas utilizadas para moldar os corpos de prova de concretos.

6.3 – Trabalhabilidade do Concreto no Estado Fresco

Como já era esperado, para todos os teores água/cimento (a/c), à medida em que se aumentou a adição mineral, houve gradativa redução no abatimento do tronco de cone (Slump), como mostra a Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Traços utilizados nos concretos

Relação a/c	Teor de adição (%)	Traço Cimento:Areia:Brita	Abatimento Tronco de Cone (mm)	Teor de Argamassa (%)	Teor de Agregado Miúdo (%)
0,45	0	1 : 1,14 : 1,65	145	56,5	40,9
	10		85	57,6	40,9
	20		60	58,7	40,9
0,55	0	1 : 1,52 : 1,99	200	55,9	43,3
	10		155	56,8	43,3
	20		105	57,8	43,3
0,65	0	1 : 2,06 : 2,52	190	54,8	45,0
	10		170	55,6	45,0
	20		140	56,4	45,0

Foi observado que, para os teores água/cimento de 0,65 e 0,55, com o aumento da adição mineral, houve ligeira melhoria na trabalhabilidade durante a moldagem dos CP's, apesar da adição ter provocado redução no abatimento do tronco de cone. Já o concreto com fator a/c de 0,45 e com 20% de adição de resíduo, apesar de não ter apresentado um slump reduzido (60 mm), a trabalhabilidade foi comprometida, devido o concreto possuir grande quantidade de finos, resultado da baixa relação a/c e da adição mineral. Com essa grande quantidade de finos, o concreto tornou-se muito coeso, apresentando maior dificuldade de adensamento e manuseio. O fato de não ter sido adicionado nenhum aditivo químico aos concretos, corroborou para esta alta coesão.

A Tabela 6.10 mostra que quanto menor a relação a/c, maior é o teor de argamassa nos concretos, e que o teor de argamassa aumenta com o aumento do percentual de adição de resíduo.

6.4 – Ensaio Físicos Realizados nos Concretos Endurecidos

6.4.1 – Ultra-sonografia

O ensaio de ultra-sonografia foi realizado efetuando-se três medições do tempo de propagação da onda ultra-sônica em cada corpo de prova. Em todos os elementos, os resultados das três medições foram muito próximos, indicando, que as medições foram realizadas com bastante critério. Com os valores dos tempos, foram calculadas as velocidades de propagação das ondas ultra-sônicas. Por meio dessas velocidades, foram estimadas as resistências mecânicas dos corpos de prova, com o auxílio de uma tabela de correlação entre velocidade da onda e resistência mecânica, prevista na norma britânica BSI 1881, Parte 206

A Tabela 6.11 apresenta os tempos médios e as velocidades médias de propagação das ondas ultra-sônicas e as estimativas de resistências médias à compressão para os concretos.

Tabela 6.11 – Resultado do ensaio de ultra-sonografia aos 28 dias

Amostra	a/c – Teor de Adição de Resíduo (%)	Tempo Médio de Propagação da onda (μs)	Velocidade Média de Propagação da onda (km/s)	Estimativa de resist. Média à Compressão (MPa)
1	0,65 – 0	38,5	5,20	32,79
2	0,65 – 10	33,2	6,02	37,96
3	0,65 – 20	37,3	5,36	33,82
4	0,55 – 0	35,8	5,59	35,25
5	0,55 – 10	36,9	5,43	34,24
6	0,55 – 20	29,1	6,87	43,34
7	0,45 – 0	26,1	7,67	48,38
8	0,45 – 10	38,0	5,27	33,25
9	0,45 – 20	37,2	5,37	33,88

6.4.2 – Permeabilidade à Água sob Pressão

Os resultados do ensaio de permeabilidade realizado nos concretos envolvidos no estudo estão apresentados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Resultado do ensaio de permeabilidade

CP	a/c – % de Adição de Resíduo	Amostra	Intervalo de leitura (min)	Leitura no micrômetro (mm)	Coeficiente de Permeabilidade (mm/s)	Coef. Perm. Média (mm/s)
1	0,65 – 0%	Topo	1,00	2,35	$6,37 \times 10^{-4}$	$7,22 \times 10^{-4}$
			2,00	3,29		
			3,00	4,40		
		Meio	1,00	3,25	$7,39 \times 10^{-4}$	
			2,00	3,31		
			3,00	5,11		
		Base	1,00	2,28	$7,89 \times 10^{-4}$	
			2,00	3,51		
			3,00	5,45		
2	0,65 – 10%	Topo	1,00	2,20	$7,83 \times 10^{-4}$	$4,67 \times 10^{-4}$
			2,00	3,49		
			3,00	5,41		
		Meio	1,00	2,21	$6,19 \times 10^{-4}$	
			2,00	3,14		
			3,00	4,28		
		Base	1,00	0,00	0,00	
			2,00	0,00		
			3,00	0,00		
3	0,65 – 20%	Topo	1,00	2,22	$5,86 \times 10^{-4}$	$4,10 \times 10^{-4}$
			2,00	3,42		
			3,00	4,05		
		Meio	1,00	1,08	$2,91 \times 10^{-4}$	
			2,00	1,46		
			3,00	2,01		
		Base	1,00	1,40	$3,53 \times 10^{-4}$	
			2,00	2,20		
			3,00	2,44		

Tabela 6.12 – Continuação

CP	a/c – % de Adição de Resíduo	Amostr a	Intervalo de leitura (min)	Leitura no micrômetro (mm)	Coefficiente de Permeabilidade (mm/s)	Coef. Perm. Média (mm/s)
4	0,55 – 0%	Topo	1,00	1,59	$3,47 \times 10^{-4}$	$3,79 \times 10^{-4}$
			2,00	2,10		
			3,00	2,40		
		Meio	1,00	1,20	$2,94 \times 10^{-4}$	
			2,00	1,58		
			3,00	2,03		
		Base	1,00	2,40	$4,95 \times 10^{-4}$	
			2,00	3,19		
			3,00	3,42		
5	0,55 – 10%	Topo	1,00	1,13	$3,01 \times 10^{-4}$	$2,66 \times 10^{-4}$
			2,00	1,41		
			3,00	2,08		
		Meio	1,00	1,17	$2,91 \times 10^{-4}$	
			2,00	1,39		
			3,00	2,01		
		Base	1,00	1,08	$2,05 \times 10^{-4}$	
			2,00	1,26		
			3,00	1,42		
6	0,55 – 20%	Topo	1,00	1,17	$2,92 \times 10^{-4}$	$2,37 \times 10^{-4}$
			2,00	1,33		
			3,00	2,02		
		Meio	1,00	1,14	$2,16 \times 10^{-4}$	
			2,00	1,33		
			3,00	1,49		
		Base	1,00	1,08	$2,03 \times 10^{-4}$	
			2,00	1,21		
			3,00	1,40		

Tabela 6.12 - Continuação

CP	a/c – % de Adição de Resíduo	Amostr a	Intervalo de leitura (min)	Leitura no micrômetro (mm)	Coeficiente de Permeabilidade (mm/s)	Coef. Perm. Média (mm/s)
7	0,45 – 0%	Topo	1,00	0,00	0,00	0,00
			2,00	0,00		
			3,00	0,00		
		Meio	1,00	0,00	0,00	
			2,00	0,00		
			3,00	0,00		
		Base	1,00	0,00	0,00	
			2,00	0,00		
			3,00	0,00		
8	0,45 – 10%	Topo	1,00	0,00	0,00	0,00
			2,00	0,00		
			3,00	0,00		
		Meio	1,00	0,00	0,00	
			2,00	0,00		
			3,00	0,00		
		Base	1,00	0,00	0,00	
			2,00	0,00		
			3,00	0,00		
9	0,45 – 20%	Topo	1,00	0,00	0,00	0,00
			2,00	0,00		
			3,00	0,00		
		Meio	1,00	0,00	0,00	
			2,00	0,00		
			3,00	0,00		
		Base	1,00	0,00	0,00	
			2,00	0,00		
			3,00	0,00		

Os resultados do ensaio de permeabilidade à água sob pressão, apresentados na Tabela 6.12, mostram, claramente, como era esperado, que a permeabilidade de água nos concretos diminuiu, à medida em que se diminuíram os fatores água/cimento, bem como, à medida em que se aumentaram os percentuais de adição de resíduo nos concretos.

Os fluxos de água no topo, no meio e na base de cada corpo de prova (CP) não apresentaram grandes diferenças, à exceção do CP 2, que apresentou vazão zero em sua base. Em todos os outros, os valores dos fluxos de água nos concretos foram um tanto quanto semelhantes.

O fator a/c de 0,45 apresentou uma particularidade, onde os concretos não se mostraram permeáveis, tendo em vista que, todos os CP's deste fator não apresentaram nenhuma permeabilidade de água, para a pressão aplicada no ensaio.

6.4.3 – Resistência à Compressão Axial

O ensaio de compressão axial, realizado para avaliar as resistências dos concretos em estudo, aos 7 dias, em 27 corpos de prova e aos 28 dias em outros 27, apresentou cargas e tensões de ruptura, de acordo com as Tabelas 6.13 e 6.14, para as idades de 7 e 28 dias, respectivamente.

Tabela 6.13 – Resultado do ensaio de compressão axial – 7 dias de idade

a/c	% de Adição de Resíduo	CP	Carga de Ruptura (kg.f)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Média de Ruptura (MPa)
0,65	0%	1	24.981	31,8	32,3
		2	23.533	30,0	
		3	27.477	35,0	
	10%	4	25.481	32,4	32,6
		5	25.602	32,6	
		6	25.773	32,8	
	20%	7	25.639	32,65	34,6
		8	28.792	36,7	
		9	27.200	34,6	
0,55	0%	10	33.418	42,6	45,6
		11	38.239	48,7	
		12	35.743	45,5	
	10%	13	32.006	40,8	41,3
		14	34.234	43,6	
		15	31.020	39,5	
	20%	16	42.622	54,3	48,7
		17	33.808	43,0	
		18	38.220	48,7	
0,45	0%	19	36.596	46,6	52,9
		20	38.434	48,9	
		21	49.573	63,1	
	10%	22	42.610	54,3	62,1
		23	48.660	62,0	
		24	55.076	70,1	
	20%	25	40.114	51,1	52,3
		26	38.531	49,1	
		27	44.618	56,8	

Tabela 6.14 – Resultado do ensaio de compressão axial – 28 dias de idade

a/c	% de Adição de Resíduo	CP	Carga de Ruptura (kg.f)	Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão Média de Ruptura (MPa)
0,65	0%	28	32.773	41,7	39,4
		29	29.230	37,2	
		30	30.862	39,3	
	10%	31	31.458	40,1	39,7
		32	32.846	41,8	
		33	29.303	37,3	
	20%	34	32.371	41,2	46,5
		35	36.535	46,5	
		36	40.698	51,8	
0,55	0%	37	39.883	50,8	52,1
		38	43.693	55,6	
		39	39.103	49,8	
	10%	40	43.500	55,4	56,8
		41	48.000	61,1	
		42	42.290	53,8	
	20%	43	41.200	52,5	53,0
		44	42.610	54,3	
		45	40.990	52,2	
0,45	0%	46	52.200	66,5	69,6
		47	54.100	68,9	
		48	57.572	73,3	
	10%	49	57.572	73,3	66,8
		50	53.104	67,6	
		51	46.822	59,6	
	20%	52	52.142	66,4	69,7
		53	53.639	68,3	
		54	58.473	74,5	

O resumo das resistências médias à compressão axial, os desvios padrões e os coeficientes de variação dos concretos, estão apresentados na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Resistência média à compressão axial dos concretos

Resistência Média à Compressão Axial (MPa)							
a/c	Concreto	0% de adição		10% de adição		20% de adição	
	Idade	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
0,45	Média	52,88	69,55	62,11	66,85	52,32	69,71
	DP	8,90	3,47	7,90	6,88	4,02	4,21
	CV	16,83	4,99	12,72	10,29	7,68	6,04
0,55	Média	45,58	52,07	41,28	56,78	48,66	52,97
	DP	3,07	3,13	2,10	3,83	5,61	1,12
	CV	6,74	6,01	5,09	6,74	11,53	2,11
0,65	Média	32,25	39,41	32,62	39,73	34,65	46,52
	DP	2,54	2,26	0,19	2,27	2,01	5,30
	CV	7,88	5,73	0,58	5,71	5,80	11,39

Obs.: a/c = relação água/cimento; DP = desvio padrão (MPa); CV = coeficiente de variação (%)

Com base nos valores das resistências mecânicas dos concretos, à idade de 28 dias, apresentadas na Tabela 6.15, pode-se dizer que, para a relação a/c de 0,65, o teor ideal de adição é de 20%, tendo em vista o aumento da resistência que passou de 39,4 MPa (para 0% de adição), para 46,5 MPa. Esta melhoria de resistência se deve ao fato de que o concreto possui alta relação a/c e, conseqüentemente uma alta porosidade. Com isso, o resíduo atuou como efeito fíler nestes concretos, diminuindo os espaços vazios da pasta de cimento, e, conseqüentemente, proporcionando ganho de resistência e melhoria na sua qualidade.

Os concretos com relação a/c de 0,55 apresentaram um teor ideal de adição mineral de 10%. Isto, porque a sua porosidade é menor que a dos concretos citados anteriormente, demandando uma quantidade menor de finos para preencher os vazios presentes na pasta de cimento dos concretos.

Já os concretos com relação a/c de 0,45, apresentaram uma ligeira perda de resistência com a adição de 10% de resíduo, enquanto que aqueles com 20% de adição, mantiveram as mesmas resistências dos concretos sem adição mineral. Porém, 20% de adição tornou o concreto com um excesso de finos e comprometeu a sua trabalhabilidade, devido a grande coesão das partículas. Portanto, os resultados mostram que não são adequadas as adições do resíduo de granito nos percentuais de 10 e 20%, sendo, talvez, necessário o uso de teores menores ou uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes.

As curvas de Abrams, geradas pelas plotagens dos resultados de compressão axial, em gráficos de tensão versus teor a/c, aos 7 e 28 dias de idade, podem ser observadas nas Figuras 6.6 e 6.7.

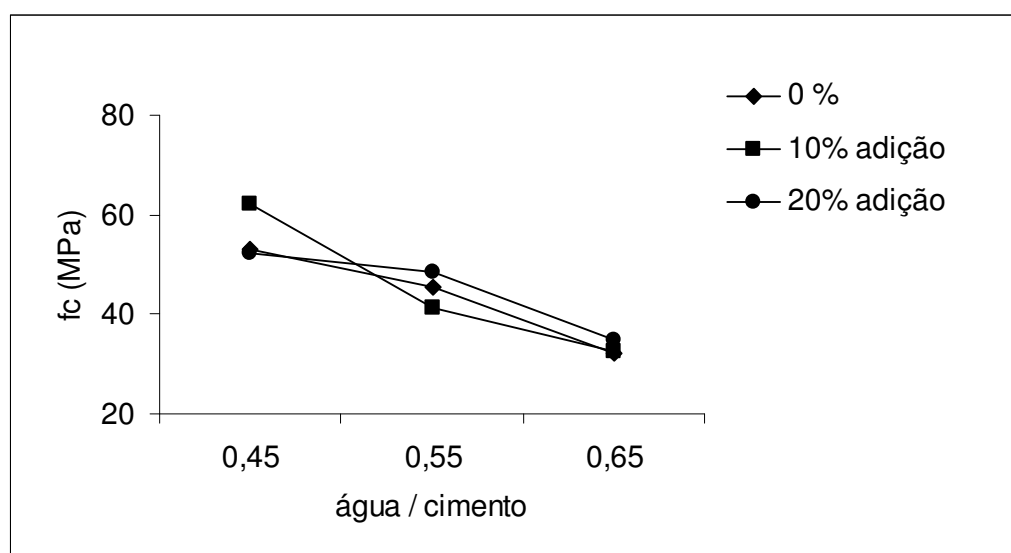


Figura 6.6 – Curva de Abrams compressão axial aos 7 dias

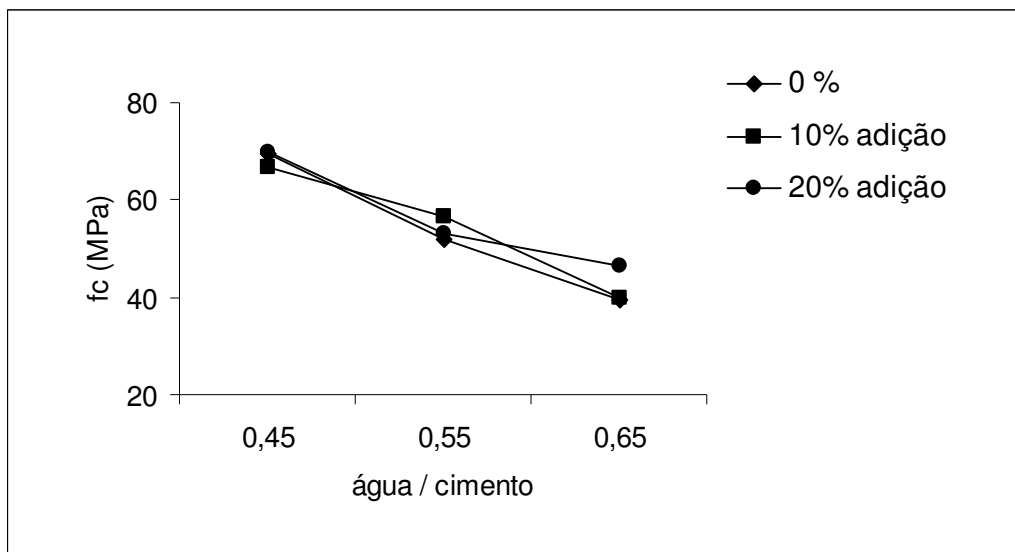


Figura 6.7 – Curva de Abrams compressão axial aos 28 dias

Os gráficos apresentados nas Figuras 6.6 e 6.7 apresentam resultados já esperados para as curvas de Abrams dos concretos, onde os resultados de tensões à compressão diminuíram com o aumento da relação a/c dos concretos.

Observa-se também que os valores dos concretos com a mesma relação a/c sofreram variações muito pequenas, à medida que se aumentou o percentual de adição de resíduo de granito. Esta observação pode ser melhor visualizada na Figura 6.8, a qual apresenta um gráfico que correlaciona as tensões de compressão axial com a variação dos percentuais de adição mineral.

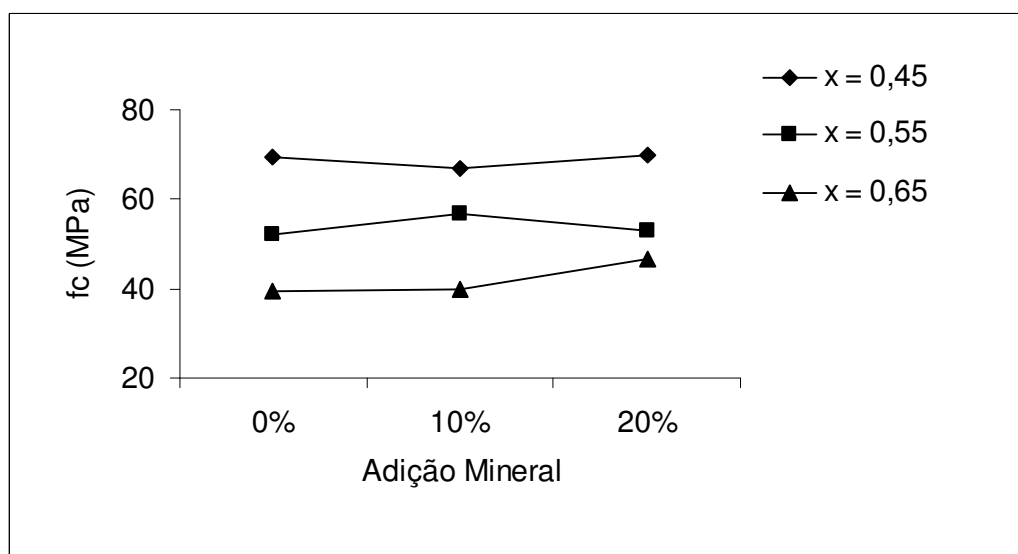


Figura 6.8 – Resultado do ensaio de compressão axial aos 28 dias

O gráfico da Figura 6.8 mostra as variações ocorridas nas tensões à compressão axial, à medida que se aumentaram os percentuais de adição de resíduo de granito. Este gráfico possibilita visualizar os teores ideais de adição mineral, sendo 10% para os concretos com relação a/c de 0,55 e 20% para aqueles com relação a/c de 0,65.

Foi realizada uma análise estatística para verificar a variância dos resultados obtidos neste ensaio, a fim de comparar a influência das variáveis investigadas, ou seja, o teor de adição do resíduo, a relação a/c, a idade dos concretos, bem como a interação entre essas variáveis, sobre a resistência mecânica dos concretos, avaliada pela compressão axial. Foi verificada a significância estatística do efeito de cada uma das variáveis, por meio da análise de variância (ANOVA). Esta técnica permite comparar grupos de observações, pela comparação da variabilidade das médias entre os grupos e a variabilidade das observações dentro de cada grupo (NANNI e RIBEIRO, 1992).

O efeito de um determinado fator sobre uma variável de resposta analisada é determinado por um teste de comparação entre valores calculados (F calculado) e os tabelados (F tabelado) de uma função de distribuição de probabilidade de Fischer. Os valores F tabelado são estabelecidos para um determinado nível de significância. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se o F calculado for maior do que o F tabelado. O nível de significância adotado nas análises foi de 5%, que é um nível comumente utilizado na área de engenharia civil. Os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 – Análise estatística dos resultados de compressão axial

Fator	GDL	MQ	F calculado	F tabelado	Significância
Teor de adição	2	7,21	0,32	6,94	DNS
a/c	2	915,84	40,74	6,94	DS
Idade concreto	1	462,48	20,57	7,71	DS
Teor adição X a/c	4	8,40	0,37	6,39	DNS
Teor adição X idade concreto	2	1,62	0,07	6,94	DNS
a/c X Idade do concreto	2	8,80	0,39	6,94	DNS
Teor adição X a/c X idade concreto	4	22,48			
Total	17				

Obs.: GDL = grau de liberdade; MQ = médias quadradas; DS = diferença significativa; DNS = diferença não significativa

A Tabela 6.16 mostra que, tanto a relação a/c quanto a idade dos concretos apresentaram influência significativa nos resultados de resistência à compressão axial dos concretos, para um nível de confiabilidade de 95%, o que confirma as grandes variações de resistência apresentadas nas Figuras 6.6 e 6.7. Já o teor de adição mineral não apresentou influência significativa nos resultados de resistências mecânicas. Esta influência não significativa da adição mineral corrobora com as pequenas variações de resistência apresentadas no gráfico da Figura 6.8.

Apesar de os fatores a/c e idade terem apresentado influência significativa nos resultados de resistência mecânica dos concretos, quando analisadas as interações entre eles, e deles com o teor de adição mineral, essas interações apresentaram influência não significativa nos resultados de compressão axial.

As influências não significativas apontadas pela análise estatística não indica que os resultados não foram satisfatórios. O teor de adição, por exemplo, apresentou influência não significativa, porém, a Figura 6.8 mostra que, com o aumento da adição mineral, as resistências se mantiveram estáveis ou apresentaram ligeira melhoria. Só o fato das resistências não apresentarem quedas significativas, já pode-se considerar que os resultados foram positivos, tendo em vista a correta destinação final de um passivo ambiental das marmorarias como adição nos concretos, diminuindo a permeabilidade e a porosidade desses concretos, resultando, possivelmente, em concretos mais duráveis.

6.4.4 – Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

Os resultados do ensaio de porosidade realizado em amostras extraídas dos corpos de prova submetidos à compressão axial com idade de 28 dias estão apresentados na Tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Resultado da Porosimetria por intrusão de Mercúrio

Amostra (a/c – adição)	Volume total de mercúrio introduzido (cm³/g)	Área total dos poros (m²/g)	Diâmetro médio dos poros (µm)	Porosidade (%)
0,65 – 0%	0,069	13,14	0,04	14,30
0,65 – 20%	0,058	11,00	0,04	12,56
0,45 – 0%	0,059	12,25	0,03	12,18
0,45 – 20%	0,058	12,25	0,03	12,00

Concretos com fatores a/c maiores são, teoricamente, concretos com maior número de poros e com poros de tamanhos maiores.

Com base nessa informação, os resultados apresentados na Tabela 6.17 mostram, que o concreto com fator a/c de 0,65, sofreu maior variação em sua porosidade com a adição do resíduo de granito, passando esta, de 14,30% para 12,56%, uma variação superior a 12% no percentual de porosidade. Este resultado é coerente com o resultado do ensaio de permeabilidade à água sob pressão, apresentado na Tabela 6.12, onde os concretos com relação a/c de 0,65 apresentou expressiva redução na permeabilidade com adição mineral de 20%. Essa redução na porosidade influenciou, também, a resistência mecânica desses concretos, passando de 39,4 MPa, com 0% de adição, para 46,5 MPa com 20% de adição de resíduo, aos 28 dias, conforme mostrado na Tabela 6.14.

Já o concreto com fator a/c de 0,45, que é naturalmente menos poroso, sofreu pouca influência em sua porosidade com a adição mineral, passando de 12,18% para 12,00%, uma variação inferior a 1,5% em sua porosidade. Esta estabilidade na porosidade refletiu na resistência desses concretos. De acordo com a Tabela 6.14, as resistências médias desses concretos, à idade de 28 dias, mantiveram-se estáveis, na ordem de 69,6 MPa.

Estes resultados mostram que, para cada relação a/c, as resistências à compressão axial possuem relação inversa com a porosidade dos concretos, sendo resistências maiores para concretos com porosidades menores.

A Tabela 6.17 mostra que a área total dos poros da amostra de concreto com a/c de 0,65, reduziu naquele com 20% de adição mineral. Esta redução na área total dos poros provocou a expressiva redução na porosidade desse concreto.

O resultado mostra, também, que a adição mineral não influenciou no diâmetro médio dos poros, indicando que estes são mais influenciados pelo teor a/c de cada concreto. Portanto não houve refinamento da estrutura dos poros dos concretos.

6.4.5 – Análise dos Concretos no Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV

As Figuras 6.9 e 6.10 mostram, respectivamente, fotomicrografias das zonas de transição dos concretos com fator a/c de 0,45, com 0% e 20% de adição de resíduo de polimento de granito, obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura, através do detector de elétrons retro-espalhados, com aumento de 350 vezes.

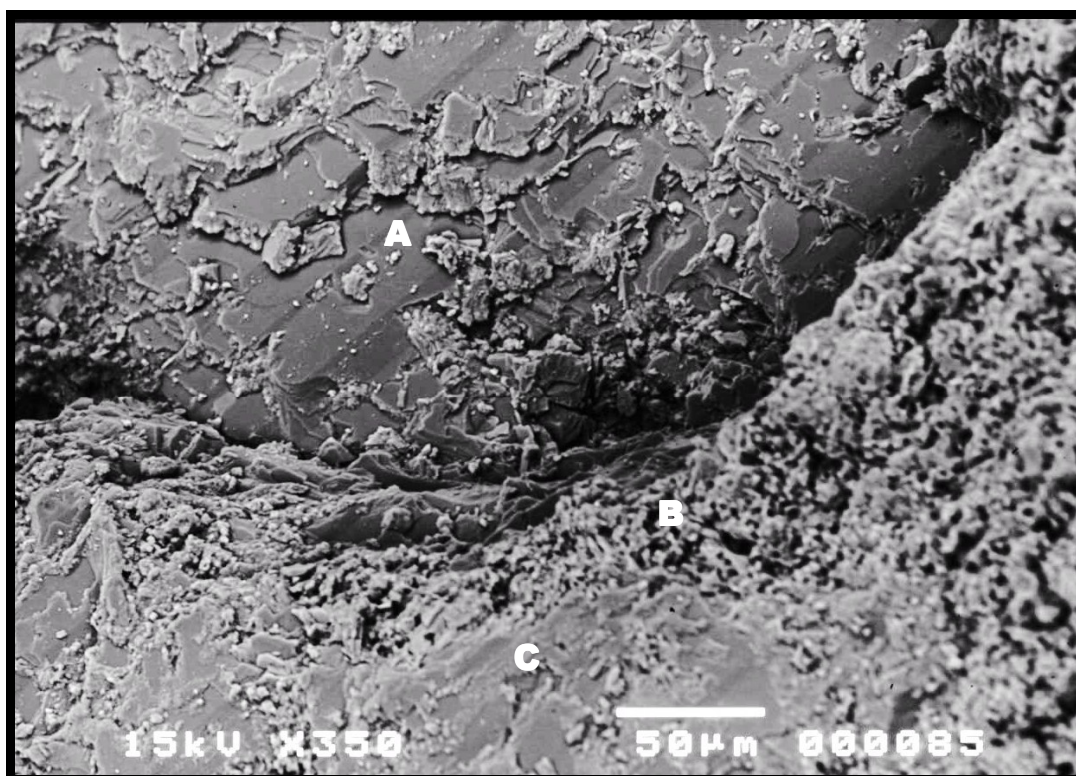


Figura 6.9 – Fotomicrografia do concreto com a/c = 0,45, adição mineral de 0% – aumento de 350X

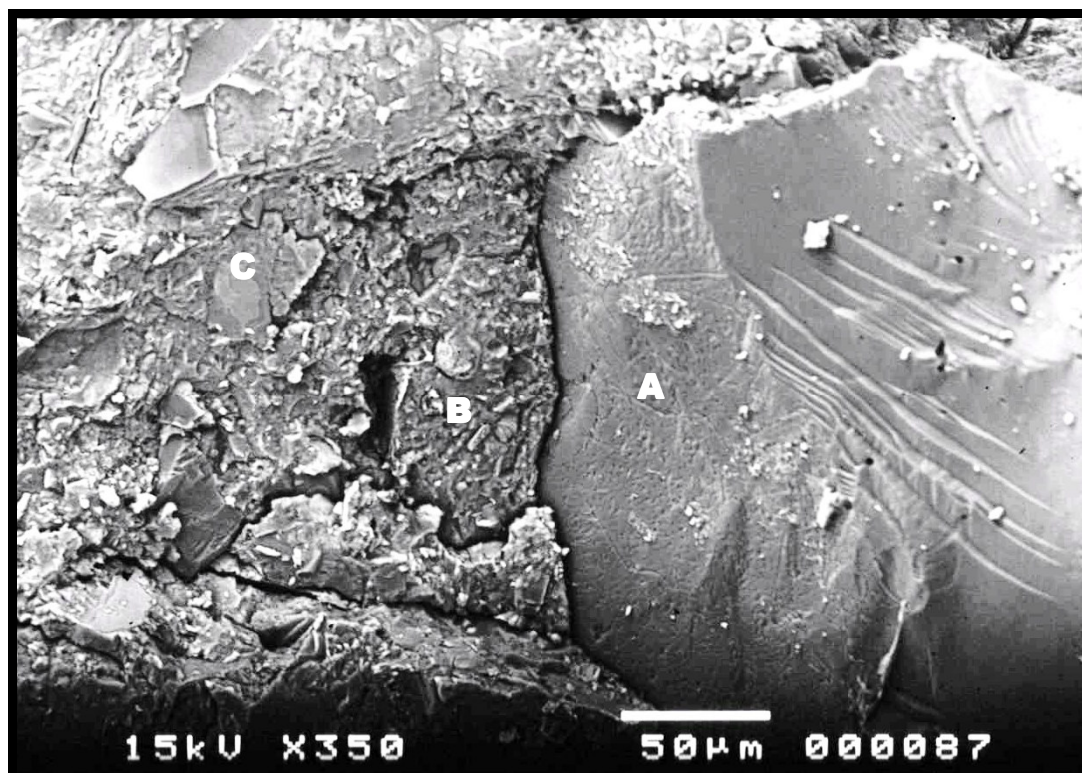


Figura 6.10 – Fotomicrografia do concreto com $a/c = 0,45$, adição mineral de 20% – aumento de 350X

Os pontos “A”, “B” e “C” das Figuras 6.9 a 6.12, representam, respectivamente, o agregado grúdo, a zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado grúdo, e a pasta de cimento presente no concreto.

O ponto “B”, na Figura 6.9, mostra claramente uma zona de transição bem definida, com características bastante diferentes das características da pasta de cimento do concreto (Ponto C).

Já na Figura 6.10, a zona de transição, representada pelo ponto “B”, é bem menos evidente, conseqüência dos 20% de adição de resíduos no concreto em relação ao concreto da Figura 6.9.

A adição mineral de 20%, para o concreto a/c de 0,45, aumentou a quantidade de finos no concreto, minimizando a exsudação próxima aos agregados grúdos, tornando o concreto mais homogêneo e coeso. Porém, essa melhoria na zona de

transição não foi suficiente para melhorar a resistência dos concretos, conforme mostrado na Tabela 6.14, pois este com relação a/c de 0,45 e 0% de adição mineral já possui grande quantidade de finos e um bom desempenho.

As Figuras 6.11 e 6.12 mostram, respectivamente, fotomicrografias das zonas de transição dos concretos com relação a/c de 0,65, com 0% e 20% de adição de resíduo, obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura, através do detector de elétrons retro-espalhados, com aumento de 350 vezes.

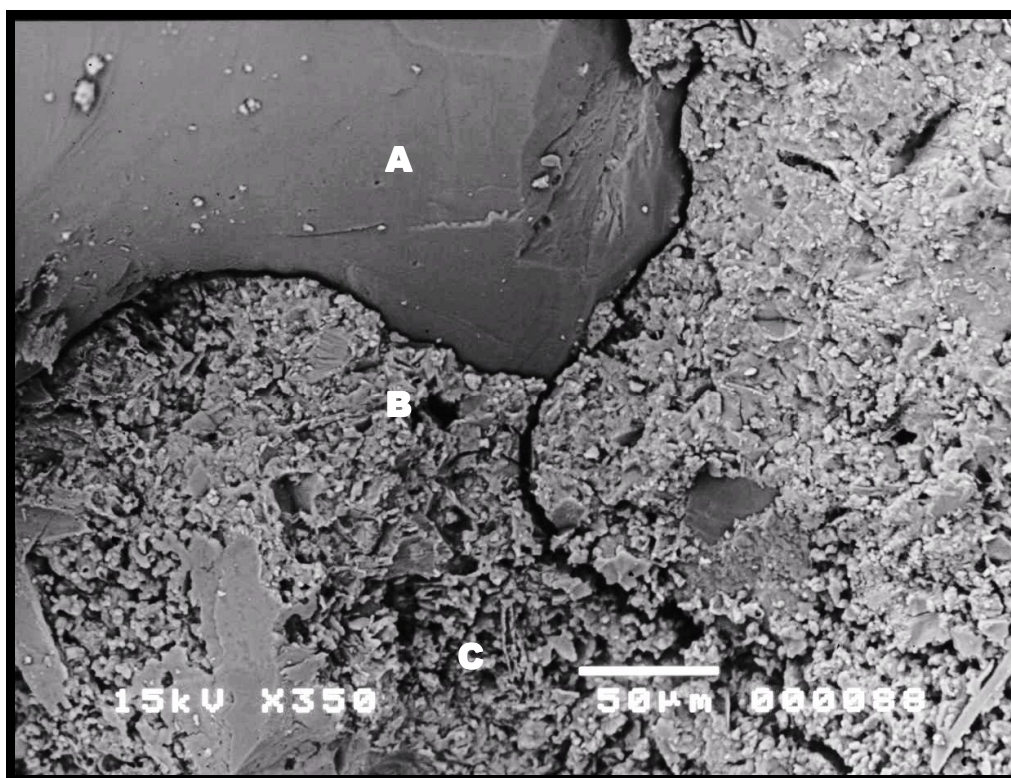


Figura 6.11 – Fotomicrografia do concreto com a/c = 0,65, adição mineral de 0% – aumento de 350X

A zona de transição da Figura 6.11 é pouco evidente, resultado da grande porosidade encontrada na argamassa do concreto, onde não se tem uma zona de transição bem definida. Porosidade esta que, provavelmente, resultou num concreto com resistência inferior à resistência do agregado, tendo em vista a fissura transversal na pasta de cimento localizada na argamassa.

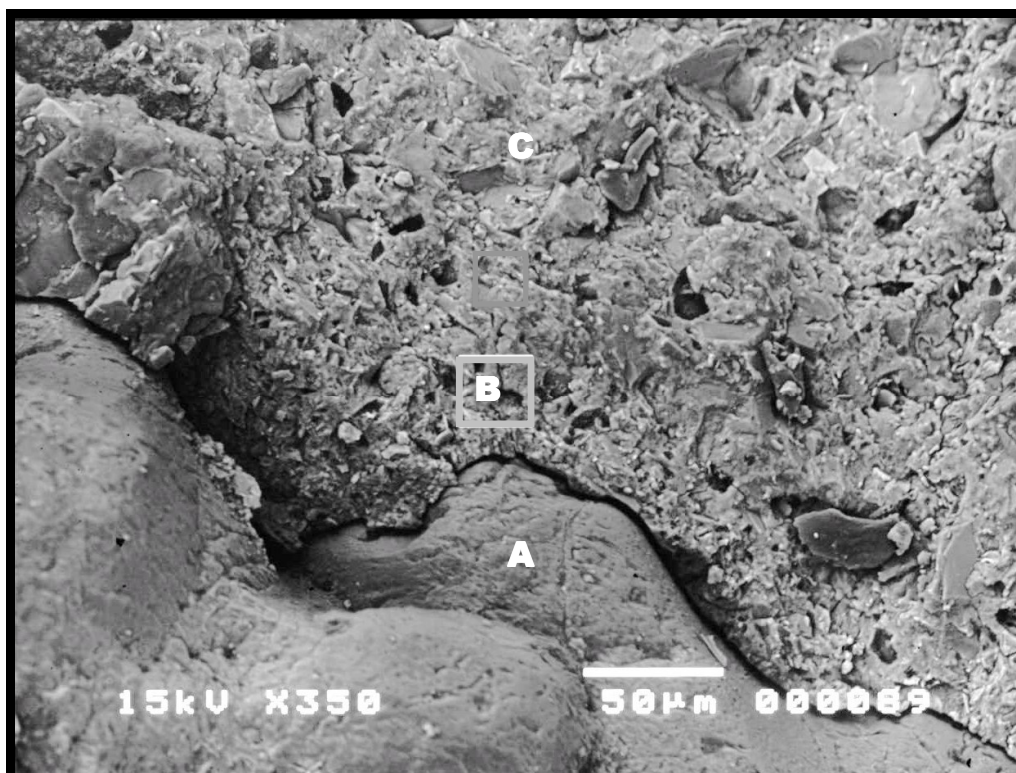


Figura 6.12 – Fotomicrografia do concreto com $a/c = 0,65$, adição mineral de 20% – aumento de 350X

A Figura 6.12 mostra um concreto com a mesma relação a/c da Figura 6.11, porém, com adição de resíduo de 20%. Esta adição não foi capaz de melhorar a porosidade da zona de transição, indicada pelo ponto “B” da figura, mas foi capaz de melhorar as características da pasta de cimento, onde se observa uma pasta menos porosa (ponto “C”) que aquela pasta apresentada na Figura 6.11. Essa diminuição na porosidade observada na pasta de cimento corrobora com os resultados de permeabilidade à água sob pressão e de porosidade, onde estes ensaios apontaram diminuição na permeabilidade e na porosidade desses concretos, conforme apresentado, respectivamente, nas Tabelas 6.12 e 6.17. A diminuição observada na porosidade deste concreto refletiu em aumento de sua resistência, conforme mostrado no resultado de resistência à compressão axial, apresentado na Tabela 6.14.

7 – CONCLUSÕES

Durante a visita técnica às marmorarias, verificou-se que o resíduo de granito, geralmente, é armazenado em conjunto com resíduos de outras rochas, fato este que demandou a necessidade de realizar uma coleta seletiva do mesmo.

Além do resíduo, apresentar, visualmente, uma granulometria semelhante à dos cimentos, o ensaio de granulometria a laser mostrou que o resíduo possui uma granulometria muito semelhante à do cimento CP - V, apresentando um diâmetro médio das partículas $D_{50} = 12,11 \mu\text{m}$, enquanto que o cimento possui um $D_{50} = 9,74 \mu\text{m}$.

Apesar de possuir um D_{50} superior ao do cimento utilizado no estudo (CP - V), o resíduo apresentou área superficial específica de $2,284 \text{ m}^2/\text{g}$, valor este bem superior ao valor da área superficial deste cimento, que é de $1,450 \text{ m}^2/\text{g}$. isto se deu, certamente, pelas diferenças de formas das partículas dos dois materiais. O resíduo foi originado do desgaste da rocha, formando partículas com superfícies muito irregulares e porosas, enquanto o cimento foi originado da moagem do clínquer, formando partículas mais regulares e arredondadas. A superfície porosa das partículas do resíduo proporcionou a sua elevada área superficial específica em relação ao cimento.

A massa específica do resíduo apresentou valor correspondente aos valores obtidos para massas específicas de rochas graníticas, comprovando que o resíduo é, realmente, proveniente dessas rochas.

A análise química mostrou que o resíduo possui, em sua composição, um somatório dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 , e Fe_2O_3 acima de 50%, valor mínimo estabelecido pela norma NBR 12.653 (1992) para que o material possa ser pozolânico. No entanto, a difração de raios-X mostrou que o resíduo possui uma estrutura cristalina, o que impede que o material seja pozolânico, tendo em vista que todas as pozolanas conhecidas possuem, pelo menos, parte da estrutura

amorfa, ou seja, sem apresentar picos evidentes no difratograma de raios-X. Portanto, pode-se concluir que o resíduo, com esta granulometria, não pode ser pozolânico, o que não impede que, com uma granulometria mais reduzida, ele possa apresentar atividade pozolânica. Os ensaios de determinação de atividade pozolânica, realizados pelos métodos físico e químico, comprovam que o resíduo estudado não é um material pozolânico.

Durante a execução dos concretos, foi observado que aqueles com relação a/c de 0,65 e 0,55, obtiveram sensíveis melhorias em suas trabalhabilidades com a adição do pó de granito, apesar da redução do slump com o aumento dessa adição. Este fato já era esperado, devido ao aumento de partículas finas nas composições dos concretos. Esta melhoria na trabalhabilidade é um fator importante, pois facilita a mistura e o adensamento dos concretos, resultando em concretos mais homogêneos, mais bem adensados e, conseqüentemente, de melhor qualidade. Porém, no concreto com relação a/c de 0,45 e com 20% de adição de resíduo, apesar de não apresentar um slump tão reduzido (60 mm), a trabalhabilidade foi fortemente comprometida, devido o concreto possuir excesso de materiais finos, resultado da baixa relação a/c e da adição mineral. Com essa grande quantidade de finos, e sem a presença de aditivos químicos, o concreto ficou muito coeso, com grande dificuldade de adensamento e manuseio. Portanto, 20% de adição do resíduo, não é um percentual indicado para este concreto, tendo em vista, principalmente, a dificuldade de manuseio, pois a resistência mecânica não foi alterada, em relação ao concreto sem adição mineral. Apesar da adição não ter contribuído para um aumento da resistência mecânica desse concreto, ela proporcionou uma melhoria nas propriedades de sua zona de transição.

Para a relação a/c de 0,65, tendo em vista o ganho de resistência do concreto com teor de adição de resíduo de 20%, em relação aquele sem adição mineral, pode-se concluir que 20% é um teor de adição ideal para esta relação a/c, que possui um grande índice de vazios. Devido a este índice de vazios, as partículas do resíduo atuaram como efeito fíler no concreto, preenchendo os espaços vazios, presentes na pasta de cimento, diminuindo a porosidade da matriz de

cimento, conforme mostrado na análise com microscópio eletrônico de varredura, proporcionando ganho de resistência e, conseqüentemente, melhoria na sua qualidade.

Para os concretos com relação a/c de 0,55, pode-se concluir que o teor ideal de adição de resíduo é de 10%. Isto, porque sua porosidade é um pouco menor que a dos concretos com relação a/c de 0,65, demandando uma quantidade menor de partículas finas para atuar como efeito fíler.

Já, para os concretos com relação a/c de 0,45, conclui-se que as adições de resíduo de 10 e 20%, não são indicadas, tendo em vista que, 10% provocou perda de resistência, enquanto que 20% de adição comprometeu, inclusive, sua trabalhabilidade, devido a alta coesão da pasta de cimento. Vale ressaltar que essa coesão excessiva se deu devido a não utilização de aditivos químicos.

Avaliando o resultado da análise de variância realizada nas resistências dos concretos aos 28 dias de idade, concluiu-se que a idade dos concretos e a relação a/c influenciaram significativamente nos valores de resistências desses concretos. Já o teor de adição de resíduo apresentou influência não significativa nas resistências dos concretos avaliados. Ao analisar a interatividade entre os três parâmetros avaliados, concluiu-se que as interações apresentaram influências não significativas nas resistências dos concretos.

8 – SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Considerando que o resíduo não apresentou atividade pozolânica, e que apresentou efeito fíler, estudar teores de adição do resíduo, menores que 10%.

Estudar a durabilidade dos concretos com adição de resíduos, tendo em vista a diminuição das porosidades destes concretos, pois essa diminuição gera uma expectativa de melhoria do desempenho dos mesmos.

Estudar a influência do resíduo no módulo de elasticidade do concreto.

Realizar estudos comparativos entre a adição do resíduo de granito e outros tipos de adição mineral.

Estudar o comportamento do resíduo como substituição ou adição ao cimento.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, Balanço das exportações brasileiras de rochas ornamentais em 2003. Disponível em www.abirochas.com.br. Acesso em 05 de junho de 2007.

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, Balanço das exportações brasileiras de rochas ornamentais em 2004. Disponível em www.abirochas.com.br. Acesso em 05 de junho de 2007.

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, Informe 04/2006, Balanço das exportações brasileiras de rochas ornamentais em 2005. Disponível em www.abirochas.com.br. Acesso em 06 de junho de 2007.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738 – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739 – Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos., Rio de Janeiro.1994.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5753 – Cimento Portland pozolânico: determinação da pozolanicidade. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT – 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. 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211 – Agregado para Concreto. Rio de Janeiro, 1983.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248 – Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 44 – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 46 – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7223 – Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 45 – Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 53 – Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52 – Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004 – Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.005 – Lixiviação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.006 – Solubilização de resíduos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.007 – Amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653 – Matérias Pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro. 1992.

AGUIAR, J. E. Avaliação dos Ensaios de Durabilidade do Concreto Armado, a Partir de Estruturas Duráveis. 2006. 173p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BRANDÃO, P. R. G. Métodos de Instrumentação e Análise. Apostila do curso de pós graduação em Engenharia de Minas e Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, 2004. 127 p.

CALMON, J.L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÉLLO, F.S.S.; SILVA, S.A. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, Anais. Salvador, BA: ANTAC, 1997, p. 64-75.

DAL MOLIN D. C. C. Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssílica. São Paulo, 1995. 286 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

DESCHAMPS et al. Controle Ambiental na Mineração de Quartzito Pedra são Tomé. Belo Horizonte: SEGRAC EDITORA E GRÁFICA LIMITADA, 2002. 201 p., Projeto Minas Ambiente.

EMBRI, Development of a framework for environmental assesement of building materials and components. Mimeo, 1994.

GONÇALVES, J, P. Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos. 2000. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GUMIERI, A. G. Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos. 2002. 226p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Poro Alegre.

JOHN, V. M. Panorama de reciclagem na construção civil. In: Revista Qualidade na Construção – SINDUSCON/SP; n. 20, Ano III, SP, 1999.

JOHN, V. M., Reciclagem de Resíduos Sólidos na Construção Civil: Contribuição à Metodologia de Pesquisa e Desenvolvimento (tese de livre docência). São Paulo: EPUSP. 102p. 2000.

JUCÁ, T. P. et al, Instituto Brasileiro do Concreto, 43^o Congresso Brasileiro do Concreto, ESTUDO DA DOSAGEM DE CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO, Foz do Iguaçu, 2001

LIMA FILHO, V. X., BEZERRA, A. C., SANTOS, F. C., NOGUEIRA, R. E. F. Q., FERNANDES, A. H. M., Estudo da viabilidade técnica da substituição dos p's cerâmicos convencionais por pó de granito na injeção de peças cerâmicas à baixa pressão. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Anais. Nov/2000, Natal/RN, (b).

LORENZI, A., CAETANO, L. F., DA SILVA FILHO, L. C. P., Redes Neurais Artificiais para Avaliação dos Resultados de Ensaios Ultrassônicos em Concretos,

VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de Calidad em la Construcción, CONPAT 2003, Vol. III, Recuperación, ISBN 968-464-135-4, Capítulo VII: Miscelânea, Trabajo BR95, pp. VII.1 – VII.7

MEHTA, P. K. ; MONTEIRO, P.J.M. Concreto – estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MINAS AMBIENTE. Ensino e desenvolvimento tecnológico para controle ambiental na indústria: pesquisa tecnologia para controle ambiental em unidades independentes de produção de ferro-gusa de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1999, 140 p. Relatório Técnico.

NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. Planejamento e Avaliação de Experimentos. 2. ed. Porto Alegre, 1992. 213p. (Caderno de Engenharia. CPGEC - UFRGS).

NEVES , Gelmires, PATRICIO, S. M. R., FERREIRA, H. C., SILVA, M. C., Utilização de resíduos da serragem de granitos para a confecção de tijolos cerâmicos. In: 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica. **Anais**. Florianópolis/SC. Jun/1999.

Norma Britânica – British Standards Institution – BSI 1881– Ultrasonic test for concrete, parte 206. 1986.

PETER et al. Rochas Ornamentais no Século XXI. Rio de Janeiro: CETEM / ABIROCHAS, 2001. 160 p.

PETRUCCI, E.G. Concreto de cimento Portland. Porto Alegre Globo, 1975, 237pg

REDE ROCHAS, Plano de Desenvolvimento do APL de Rochas Ornamentais de Cachoeiro de Itapemirim, 2004.

Resolução CONAMA 307. Dispõe sobre gestão dos resíduos da construção civil.
Julho de 2002

SATO, N.M.N.; ANTUNES, R.PN.; JOHN, V.M. Influência da porosidade nos processos de fixação e transporte de água em pastas de gesso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4., 2001, Brasília. Anais... Brasília: Universidade de Brasília, 2001. p.485 - 497.

SINROCHAS-MG - Sindicato da Indústria de Mármore e Granitos no Estado de Minas Gerais. Projeto Rochas de Minas: Estudo de Competitividade do Setor de Rochas Ornamentais e Revestimento do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2003.

ANEXOS

**Anexo A – Resultado da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio – Concreto
com relação a/c = 0,45 e com 0% de Adição de Resíduo**

AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /203

OPERATOR: PAULO

LP 09:23:32 07/09/87

SAMPLE ID: AMOSTRA 1 045 REF

HP 10:17:36 07/09/87

SUBMITTER: MOISES

REP 13:41:57 07/10/87

PENETROMETER NUMBER: 61707

ADVANCING CONTACT ANGLE: 140.0 deg

PENETROMETER CONSTANT: 11.01 $\mu\text{L/pF}$

RECEDING CONTACT ANGLE: 140.0 deg

PENETROMETER WEIGHT: 62.6923 g

MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm

STEM VOLUME: 0.3920 mL

MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL

MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.4500 psia

SAMPLE WEIGHT: 4.5462 g

PENETROMETER VOLUME: 6.0534 mL

SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 119.1698 g

LOW PRESSURE:

EVACUATION PRESSURE: 50 μmHg

EVACUATION TIME: 5 min

MERCURY FILLING PRESSURE: 1.4577 psia

EQUILIBRATION TIME: 10 sec

HIGH PRESSURE:

EQUILIBRATION TIME: 10 sec

INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0.0594 mL/g
TOTAL PORE AREA =	12.250 sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0.0289 μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0.0104 μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0.0194 μm
BULK DENSITY =	2.0514 g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2.3358 g/mL
POROSITY =	12.18 %
STEM VOLUME USED =	69 %

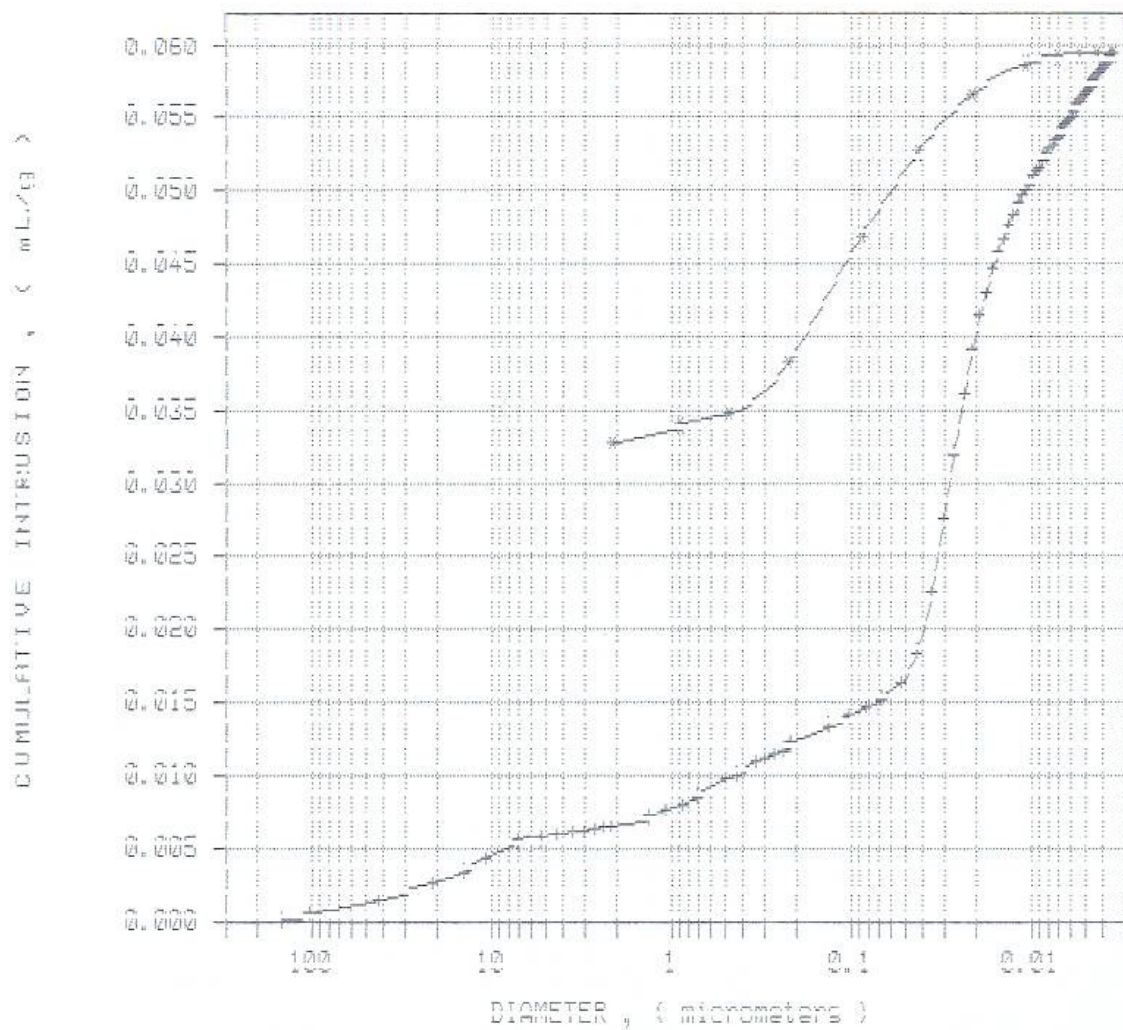
AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 5

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /203
 OPERATOR: PAULO
 SAMPLE ID: AMOSTRA 1 045 REF
 SUBMITTER: MOISES

LP 09:23:32 07/09/87
 HP 10:17:36 07/09/87
 REP 13:41:57 07/10/87

CUMULATIVE INTRUSION VS DIAMETER
 + intrusion, * extrusion



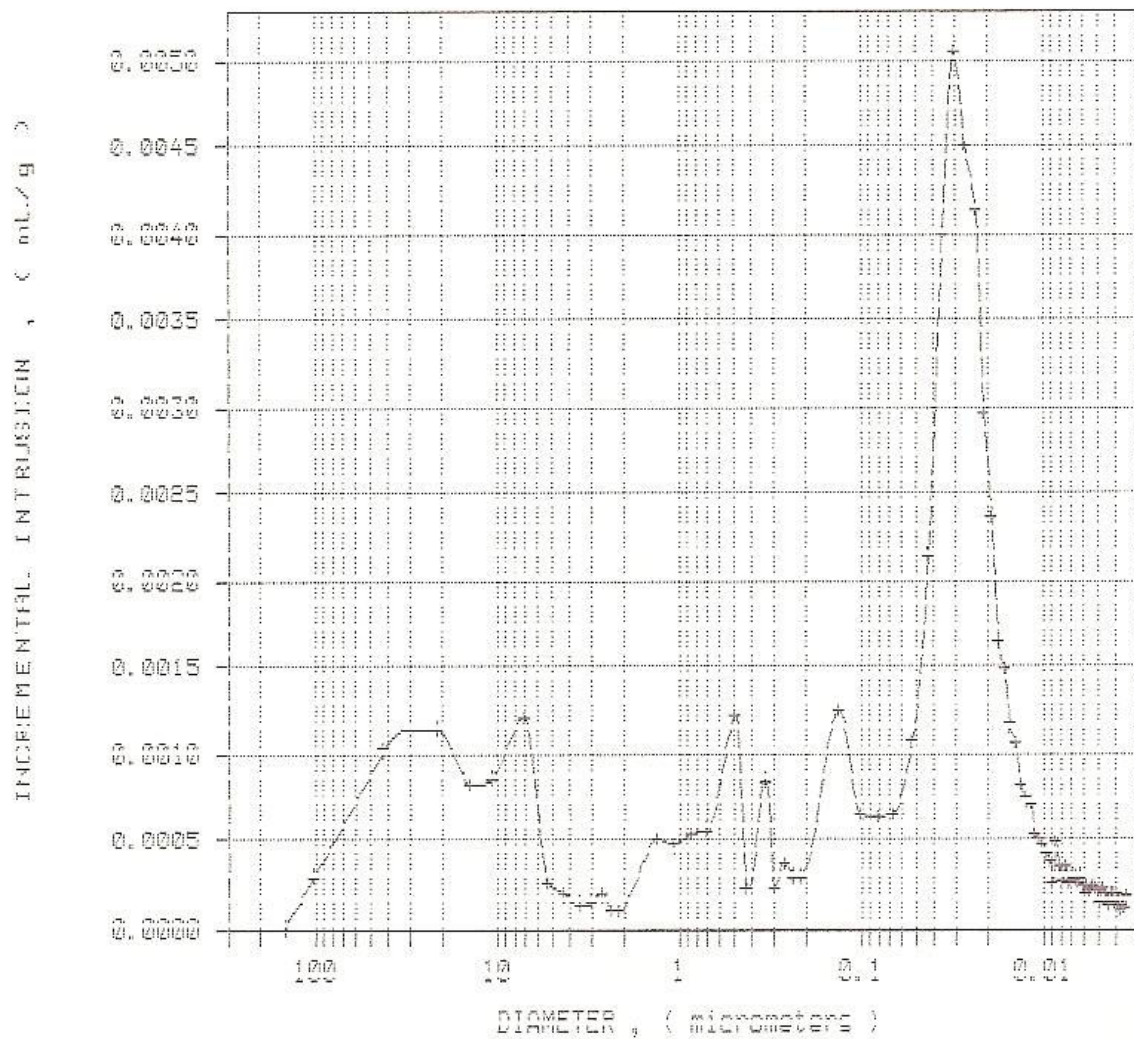
AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 6

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /203
 OPERATOR: PAULO
 SAMPLE ID: AMOSTRA 1 045 REF
 SUBMITTER: MOISES

LP 09:23:32 07/09/87
 HP 10:17:36 07/09/87
 REP 13:41:57 07/10/87

INCREMENTAL INTRUSION vs DIAMETER



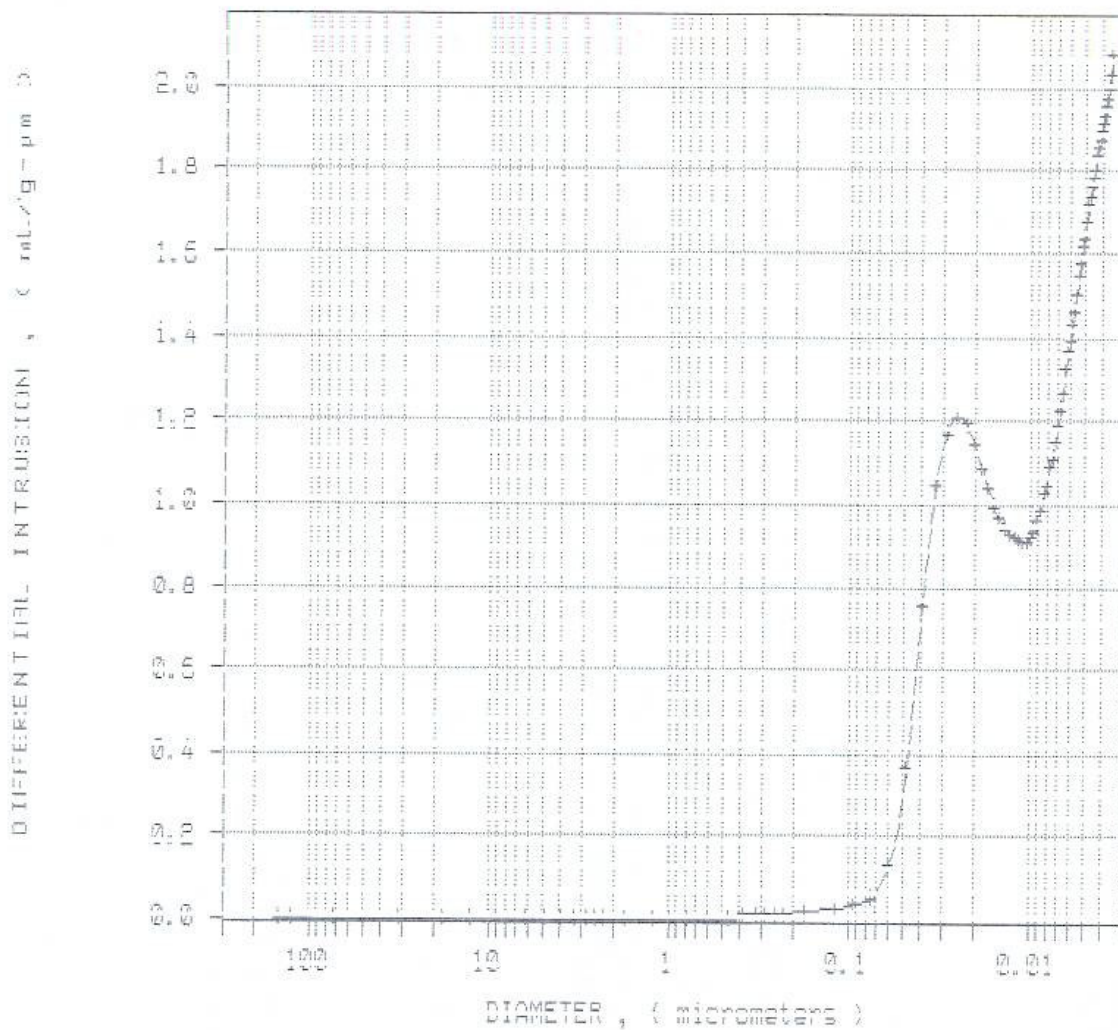
AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 7

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /203
OPERATOR: PAULO
SAMPLE ID: AMOSTRA 1 045 REF
SUBMITTER: MOISES

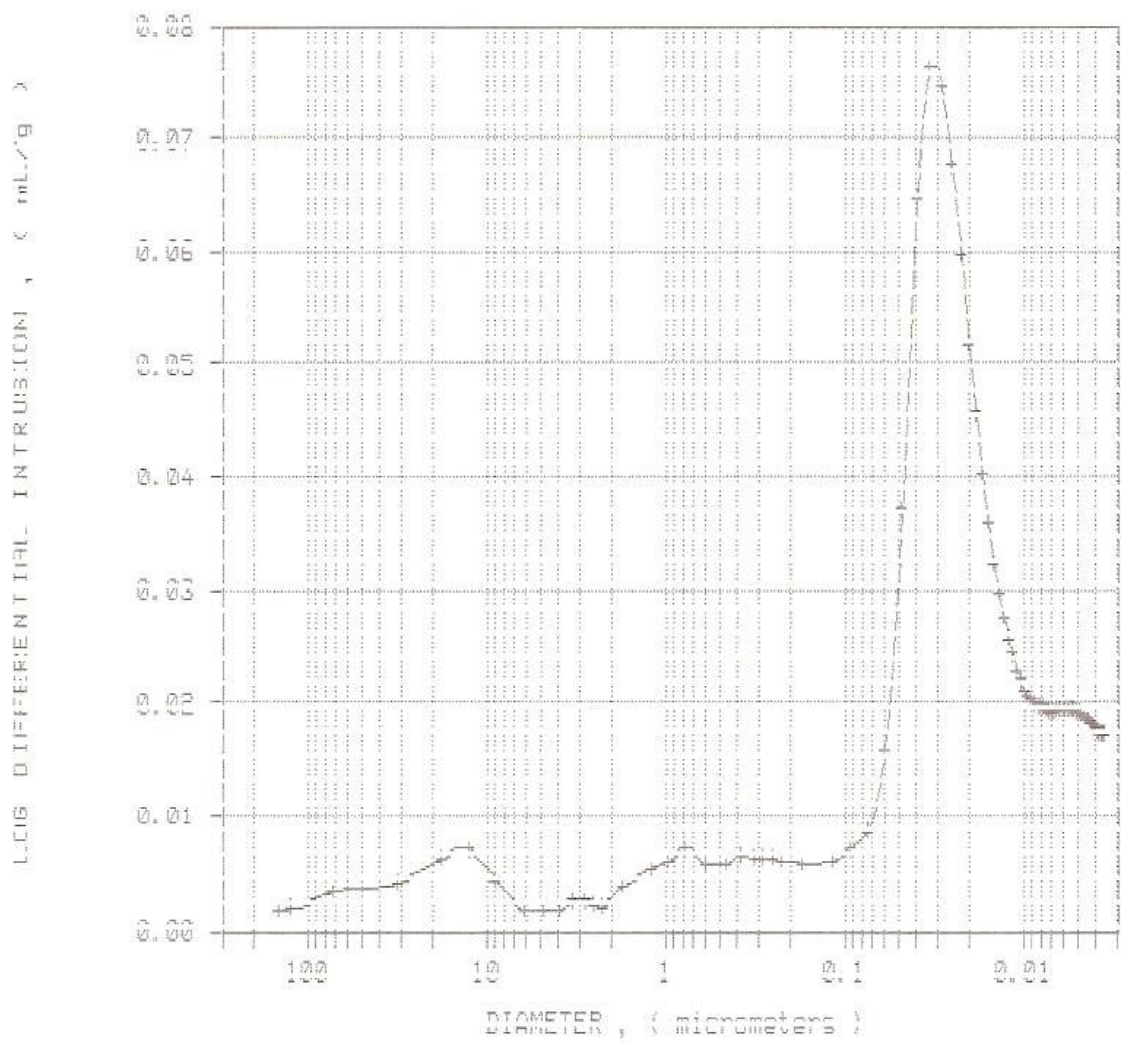
LP 09:23:32 07/09/87
HP 10:17:36 07/09/87
REP 13:41:57 07/10/87

DIFFERENTIAL INTRUSION VS DIAMETER



PEB

LOG DIFFERENTIAL INTRUSION VS DIAMETER



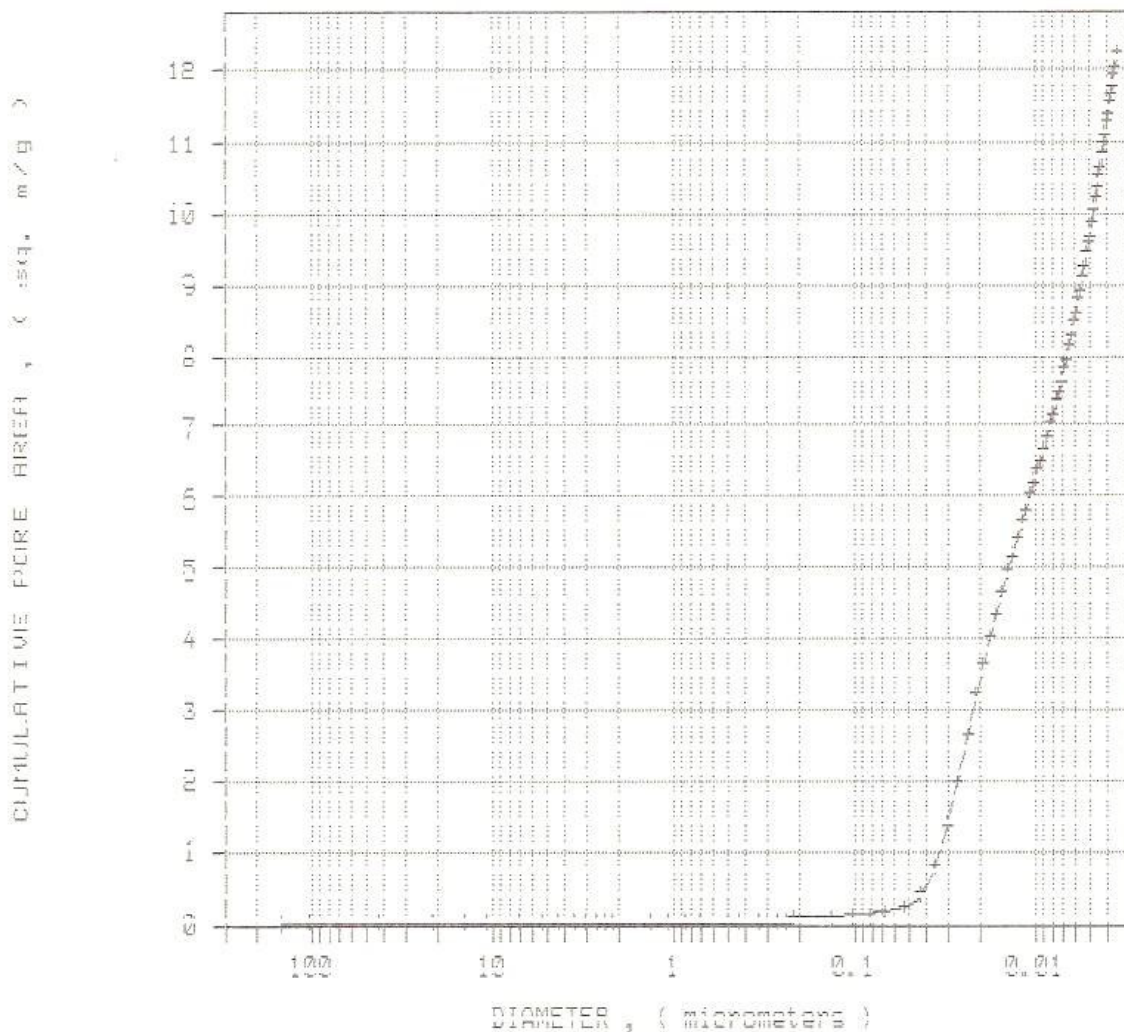
AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 9

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /203
OPERATOR: PAULO
SAMPLE ID: AMOSTRA 1 045 REF
SUBMITTER: MOISES

LP 09:23:32 07/09/87
HP 10:17:36 07/09/87
REP 13:41:57 07/10/87

CUMULATIVE PORE AREA VS DIAMETER



**Anexo B – Resultado da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio – Concreto
com relação a/c = 0,45 e com 20% de Adição de Resíduo**

AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /204

OPERATOR: PAULO

SAMPLE ID: AMOSTRA 2 045 20%

SUBMITTER: MOISES

LP 11:23:31 07/09/87

HP 11:59:39 07/09/87

REP 13:52:34 07/10/87

PENETROMETER NUMBER: 61707	ADVANCING CONTACT ANGLE: 140.0 deg
PENETROMETER CONSTANT: 11.01 $\mu\text{L}/\text{pF}$	RECEDING CONTACT ANGLE: 140.0 deg
PENETROMETER WEIGHT: 62.7150 g	MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm
STEM VOLUME: 0.3920 mL	MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.4500 psia	SAMPLE WEIGHT: 4.6815 g
PENETROMETER VOLUME: 6.0534 mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 118.8849 g

LOW PRESSURE:

EVACUATION PRESSURE:	50 μmHg
EVACUATION TIME:	5 min
MERCURY FILLING PRESSURE:	1.4402 psia
EQUILIBRATION TIME:	10 sec

HIGH PRESSURE:

EQUILIBRATION TIME:	10 sec
---------------------	--------

INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0.0577 mL/g
TOTAL PORE AREA =	12.254 sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0.0268 μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0.0113 μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0.0188 μm
BULK DENSITY =	2.0817 g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2.3657 g/mL
POROSITY =	12.00 %
STEM VOLUME USED =	69 %

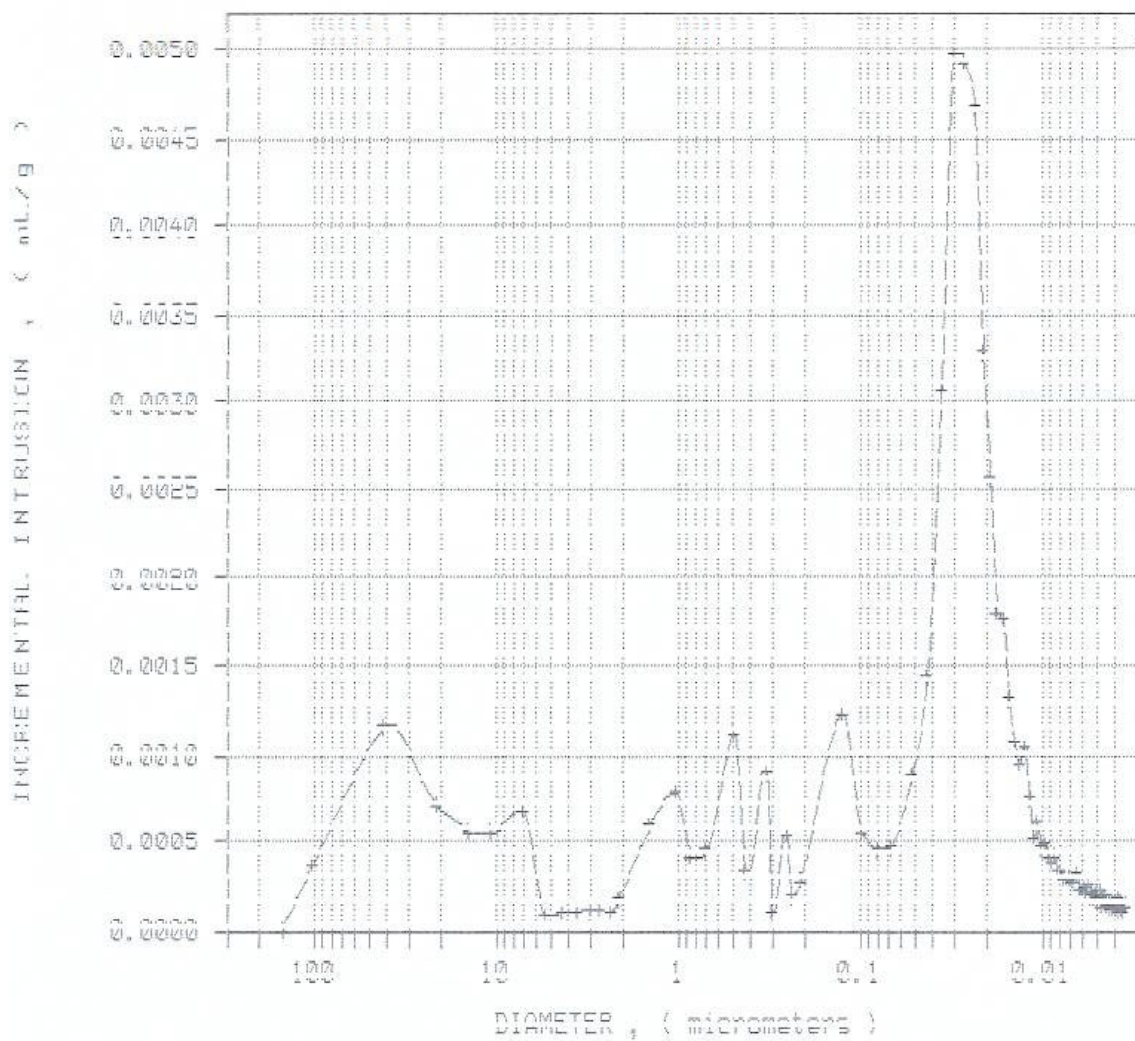
AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 6

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /204
 OPERATOR: PAULO
 SAMPLE ID: AMOSTRA 2 045 20%
 SUBMITTER: MOISES

LP 11:23:31 07/09/87
 HP 11:59:39 07/09/87
 REP 13:52:34 07/10/87

INCREMENTAL INTRUSION VS DIAMETER
 INCREMENTAL INTRUSION VS DIAMETER



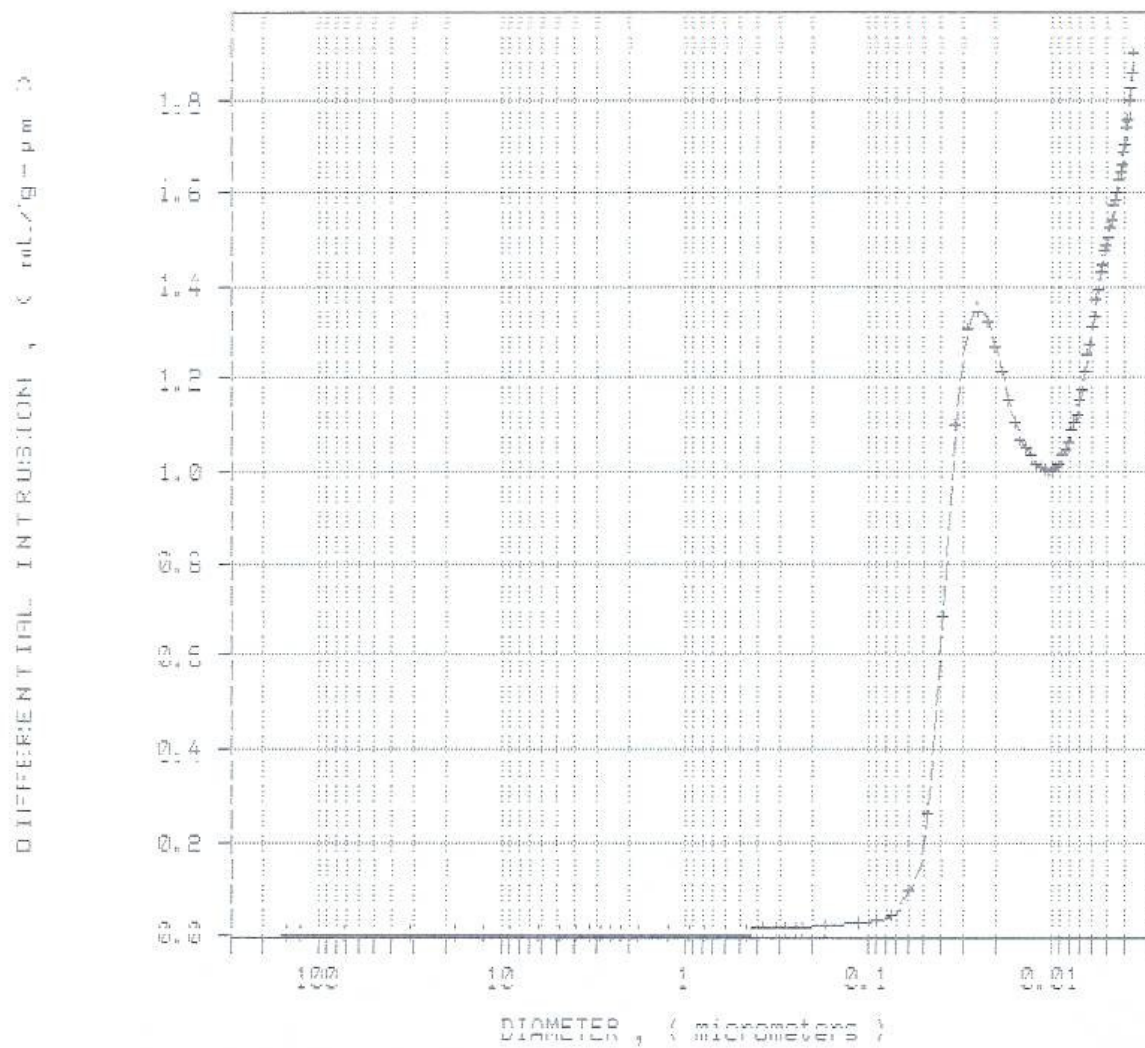
AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 7

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /204
 OPERATOR: PAULO
 SAMPLE ID: AMOSTRA 2 045 20%
 SUBMITTER: MOISES

LP 11:23:31 07/09/87
 HP 11:59:39 07/09/87
 REP 13:52:34 07/10/87

DIFFERENTIAL INTRUSION VS DIAMETER
 DIFFERENTIAL INTRUSION VS DIAMETER



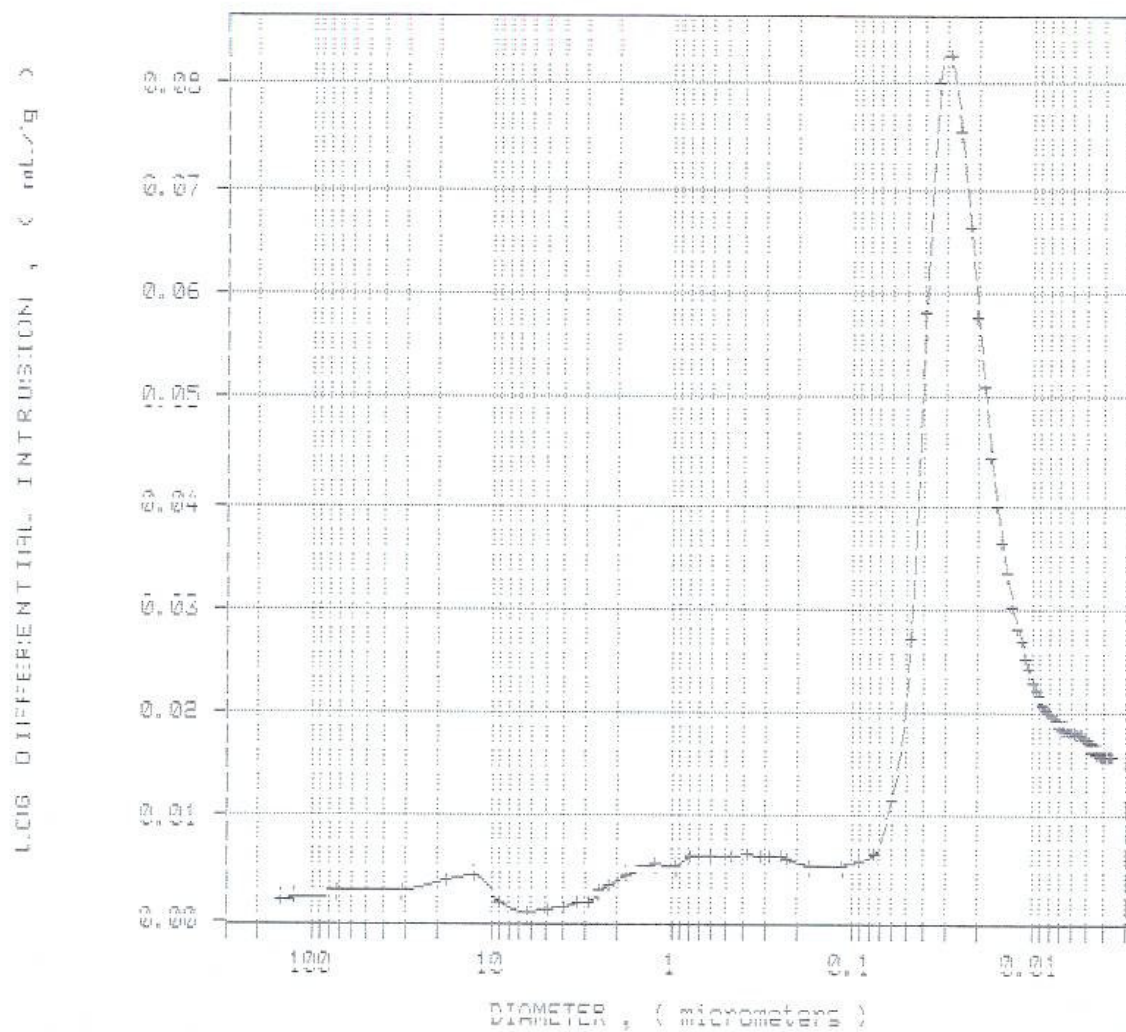
AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 8

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /204
 OPERATOR: PAULO
 SAMPLE ID: AMOSTRA 2 045 20%
 SUBMITTER: MOISES

LP 11:23:31 07/09/87
 HP 11:59:39 07/09/87
 REP 13:52:34 07/10/87

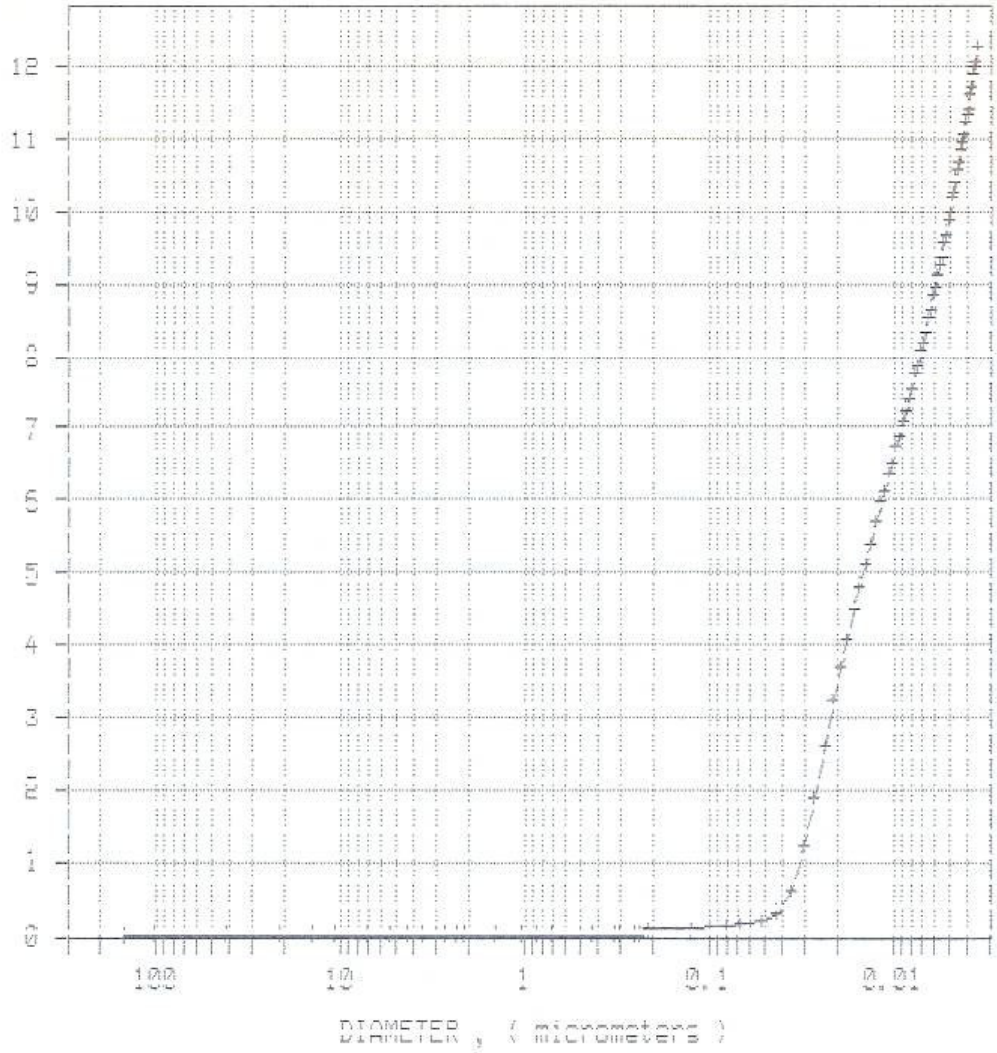
LOG DIFFERENTIAL INTRUSION VS DIAMETER



PE9

CUMULATIVE PORE AREA VS. DIAMETER

CUMULATIVE PORE AREA, (sq. m/g)



**Anexo C – Resultado da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio – Concreto
com relação a/c = 0,65 e com 0% de Adição de Resíduo**

AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /206
OPERATOR: PAULO
SAMPLE ID: AMOSTRA 3 065 REF
SUBMITTER: MOISES

LP 15:36:42 07/09/87
HP 16:17:59 07/09/87
REP 14:07:56 07/10/87

PENETROMETER NUMBER: 61707	ADVANCING CONTACT ANGLE: 140.0 deg
PENETROMETER CONSTANT: 11.01 $\mu\text{L}/\text{pF}$	RECEDING CONTACT ANGLE: 140.0 deg
PENETROMETER WEIGHT: 62.7205 g	MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm
STEM VOLUME: 0.3920 mL	MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.4500 psia	SAMPLE WEIGHT: 2.9456 g
PENETROMETER VOLUME: 6.0534 mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 128.4027 g

LOW PRESSURE:

EVACUATION PRESSURE:	50 μmHg
EVACUATION TIME:	5 min
MERCURY FILLING PRESSURE:	1.4399 psia
EQUILIBRATION TIME:	10 sec

HIGH PRESSURE:

EQUILIBRATION TIME:	10 sec
---------------------	--------

INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0.0689 mL/g
TOTAL PORE AREA =	13.141 sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0.0370 μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0.0082 μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0.0210 μm
BULK DENSITY =	2.0777 g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2.4245 g/mL
POROSITY =	14.30 %
STEM VOLUME USED =	52 %

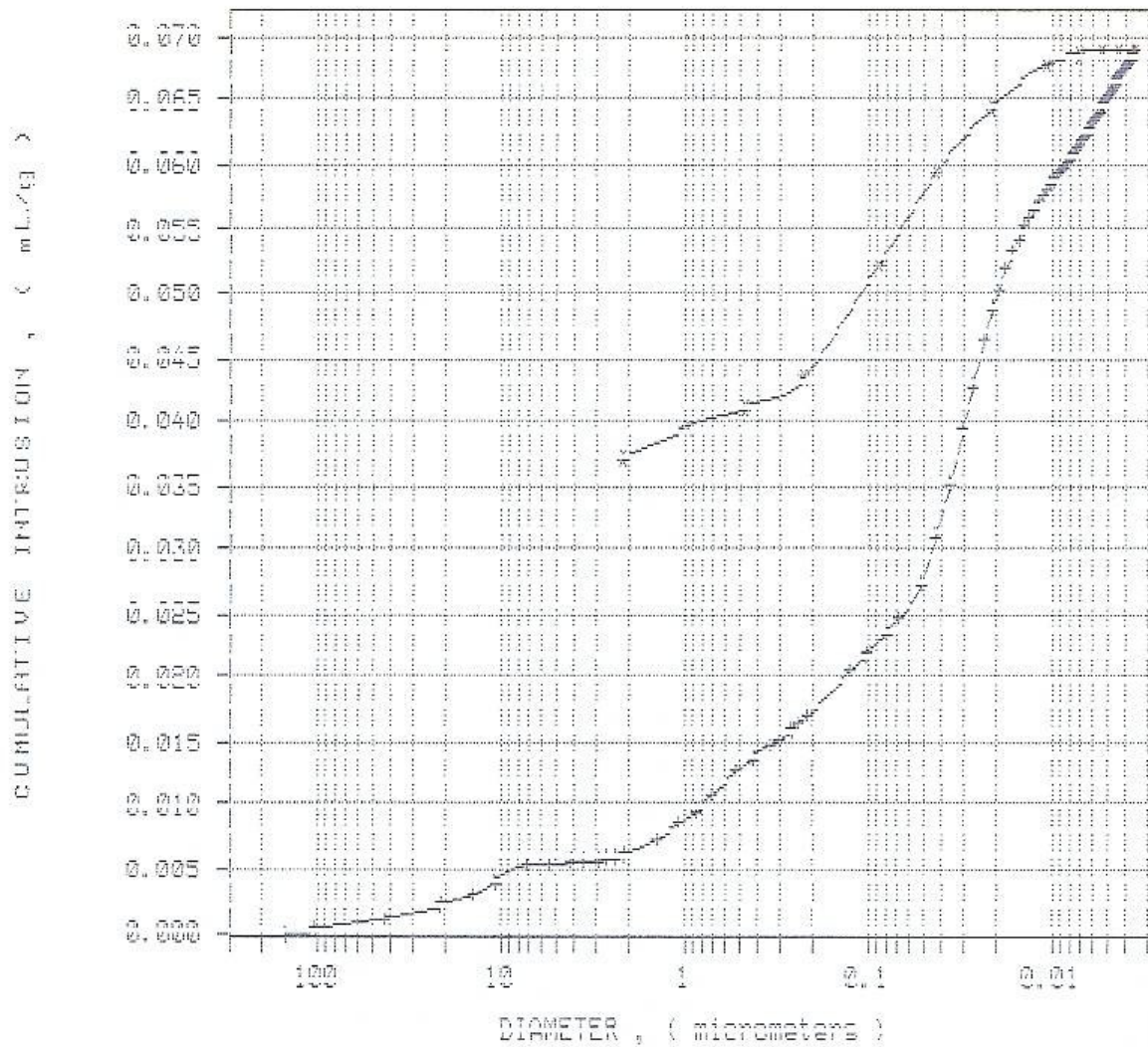
AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 5

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /206
 OPERATOR: PAULO
 SAMPLE ID: AMOSTRA 3 065 REF
 SUBMITTER: MOISES

LP 15:36:42 07/09/87
 HP 16:17:59 07/09/87
 REP 14:07:56 07/10/87

CUMULATIVE INTRUSION VS DIAMETER
 CUMULATIVE INTRUSION VS DIAMETER
 + intrusion, * extrusion



AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 6

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /206

OPERATOR: PAULO

LP 15:36:42 07/09/87

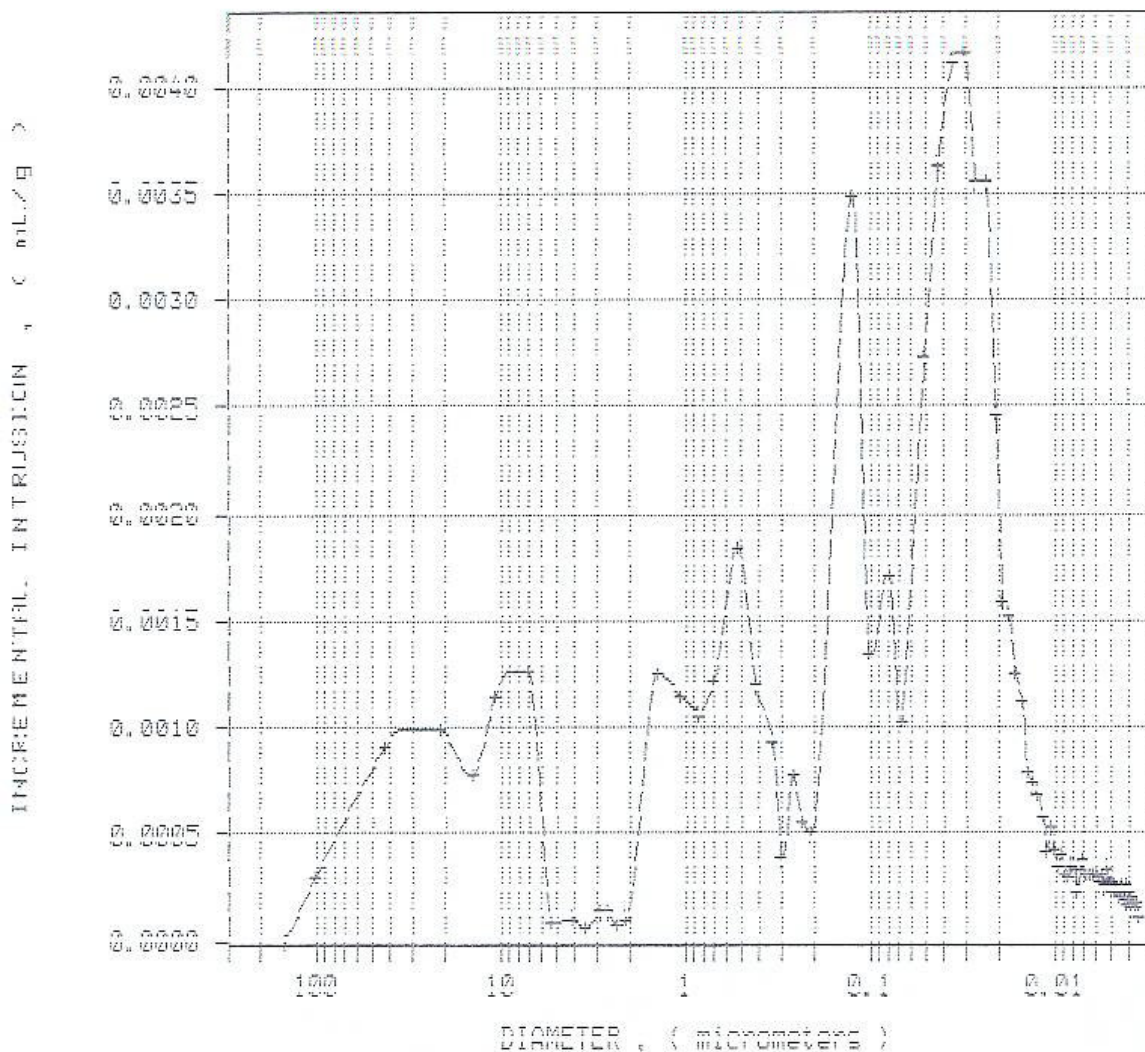
SAMPLE ID: AMOSTRA 3 065 REF

HP 16:17:59 07/09/87

SUBMITTER: MOISES

REP 14:07:56 07/10/87

INCREMENTAL INTRUSION (mL/g)



AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 7

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /206

OPERATOR: PAULO

SAMPLE ID: AMOSTRA 3 065 REF

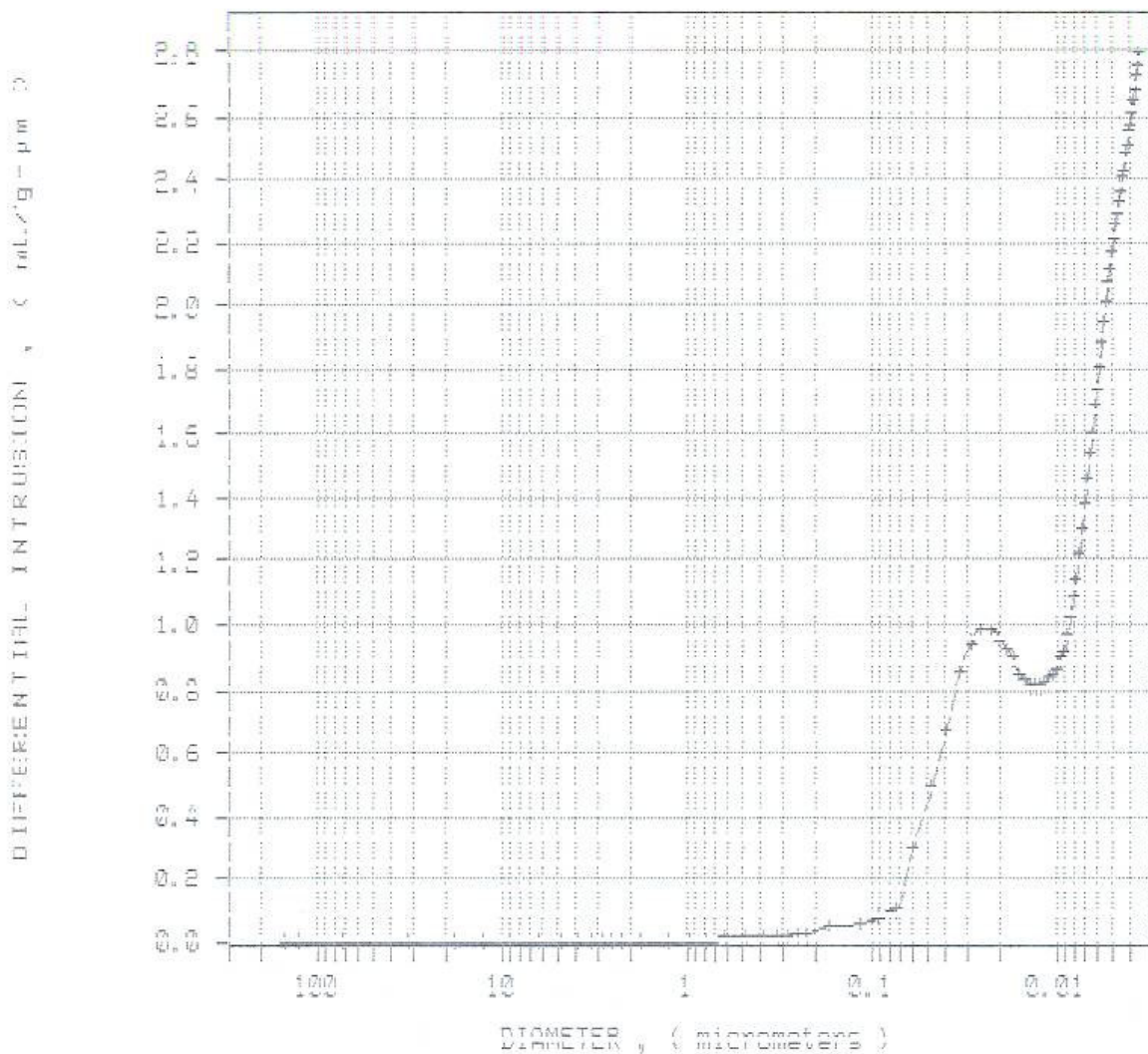
SUBMITTER: MOISES

LP 15:36:42 07/09/87

HP 16:17:59 07/09/87

REP 14:07:56 07/10/87

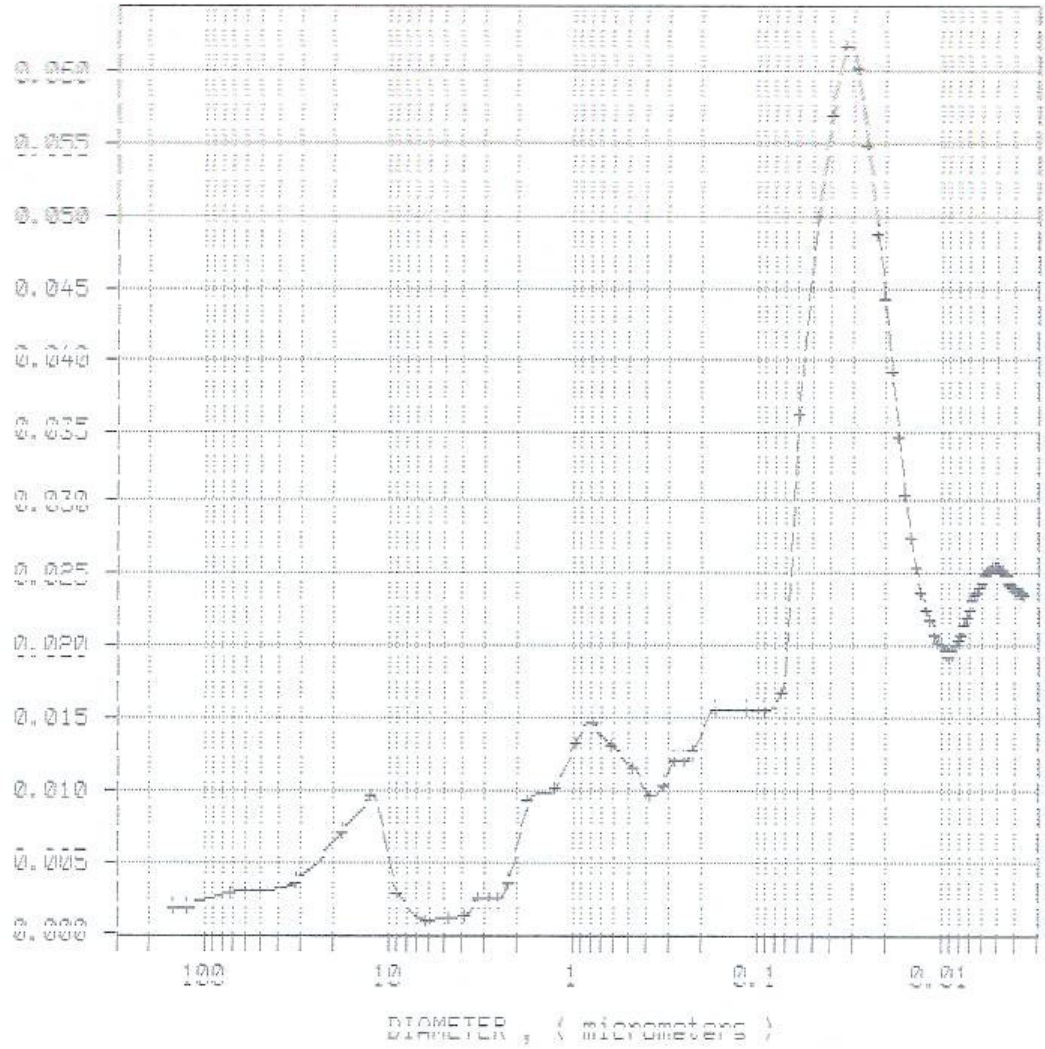
DIFFERENTIAL INTRUSION vs DIAMETER
DIFFERENTIAL INTRUSION vs DIAMETER



768

LOG DIFFERENTIAL INTRUSION VS DIAMETER

LOG DIFFERENTIAL INTRUSION, (vol. %)



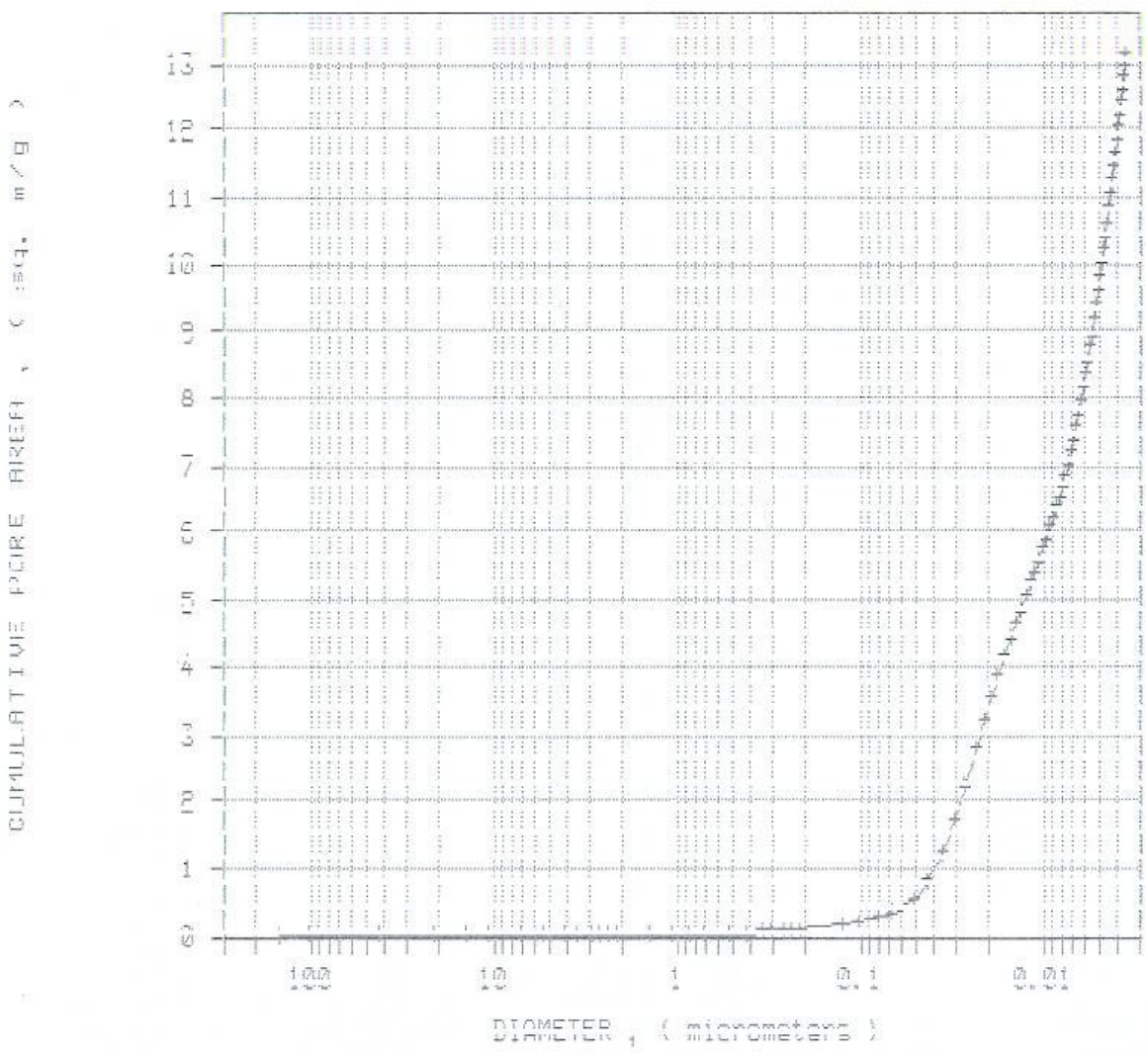
AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 9

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /206
OPERATOR: PAULO
SAMPLE ID: AMOSTRA 3 065 REF
SUBMITTER: MOISES

LP 15:36:42 07/09/87
HP 16:17:59 07/09/87
REP 14:07:56 07/10/87

CUMULATIVE PORE AREA VS DIAMETER



**Anexo D – Resultado da Porosimetria por Intrusão de Mercúrio – Concreto
com relação a/c = 0,65, e com 20% de Adição de Resíduo**

AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 1

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /207

OPERATOR: PAULO

LP 11:01:36 07/10/87

SAMPLE ID: AMOSTRA 4 065 20%

HP 11:40:28 07/10/87

SUBMITTER: MOISES

REP 14:23:01 07/10/87

PENETROMETER NUMBER: 61707	ADVANCING CONTACT ANGLE: 140.0 deg
PENETROMETER CONSTANT: 11.01 $\mu\text{L/pF}$	RECEDING CONTACT ANGLE: 140.0 deg
PENETROMETER WEIGHT: 62.7127 g	MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm
STEM VOLUME: 0.3920 mL	MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL
MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.4500 psia	SAMPLE WEIGHT: 3.0435 g
PENETROMETER VOLUME: 6.0534 mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 128.7178 g

LOW PRESSURE:

EVACUATION PRESSURE:	50 μmHg
EVACUATION TIME:	5 min
MERCURY FILLING PRESSURE:	1.4499 psia
EQUILIBRATION TIME:	10 sec

HIGH PRESSURE:

EQUILIBRATION TIME:	10 sec
---------------------	--------

INTRUSION DATA SUMMARY

TOTAL INTRUSION VOLUME =	0.0578 mL/g
TOTAL PORE AREA =	11.003 sq-m/g
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	0.0376 μm
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0.0085 μm
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0.0210 μm
BULK DENSITY =	2.1722 g/mL
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2.4841 g/mL
POROSITY =	12.56 %
STEM VOLUME USED =	45 %

AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 5

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /207

OPERATOR: PAULO

SAMPLE ID: AMOSTRA 4 065 20%

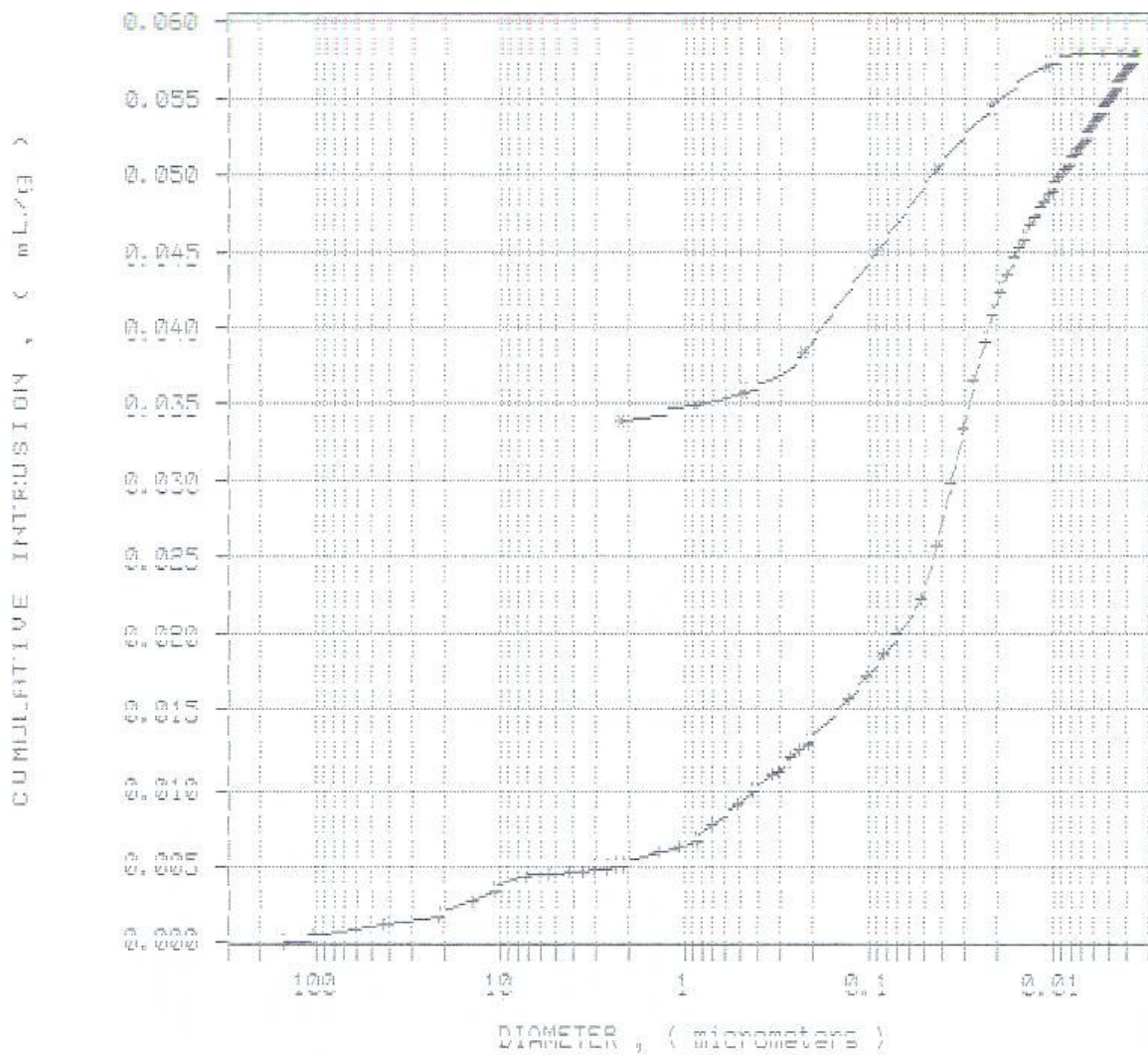
SUBMITTER: MOISES

LP 11:01:36 07/10/87

HP 11:40:28 07/10/87

REP 14:23:01 07/10/87

CUMULATIVE INTRUSION VS DIAMETER
 + intrusion, * extrusion



AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 6

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /207

OPERATOR: PAULO

LP 11:01:36 07/10/87

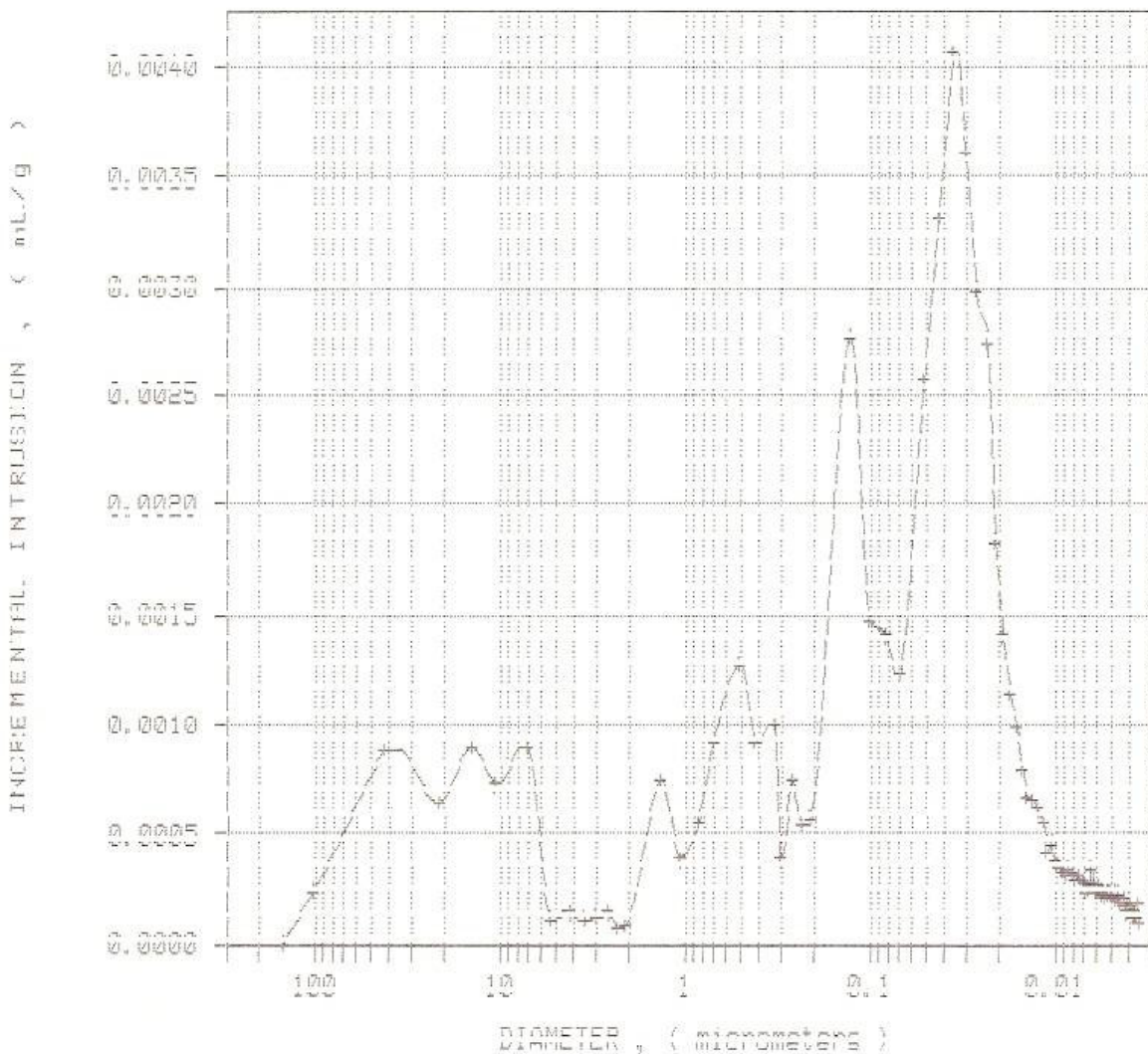
SAMPLE ID: AMOSTRA 4 065 20%

HP 11:40:28 07/10/87

SUBMITTER: MOISES

REP 14:23:01 07/10/87

INCREMENTAL INTRUSION VS DIAMETER



AUTOPORE III 9410 V1.02

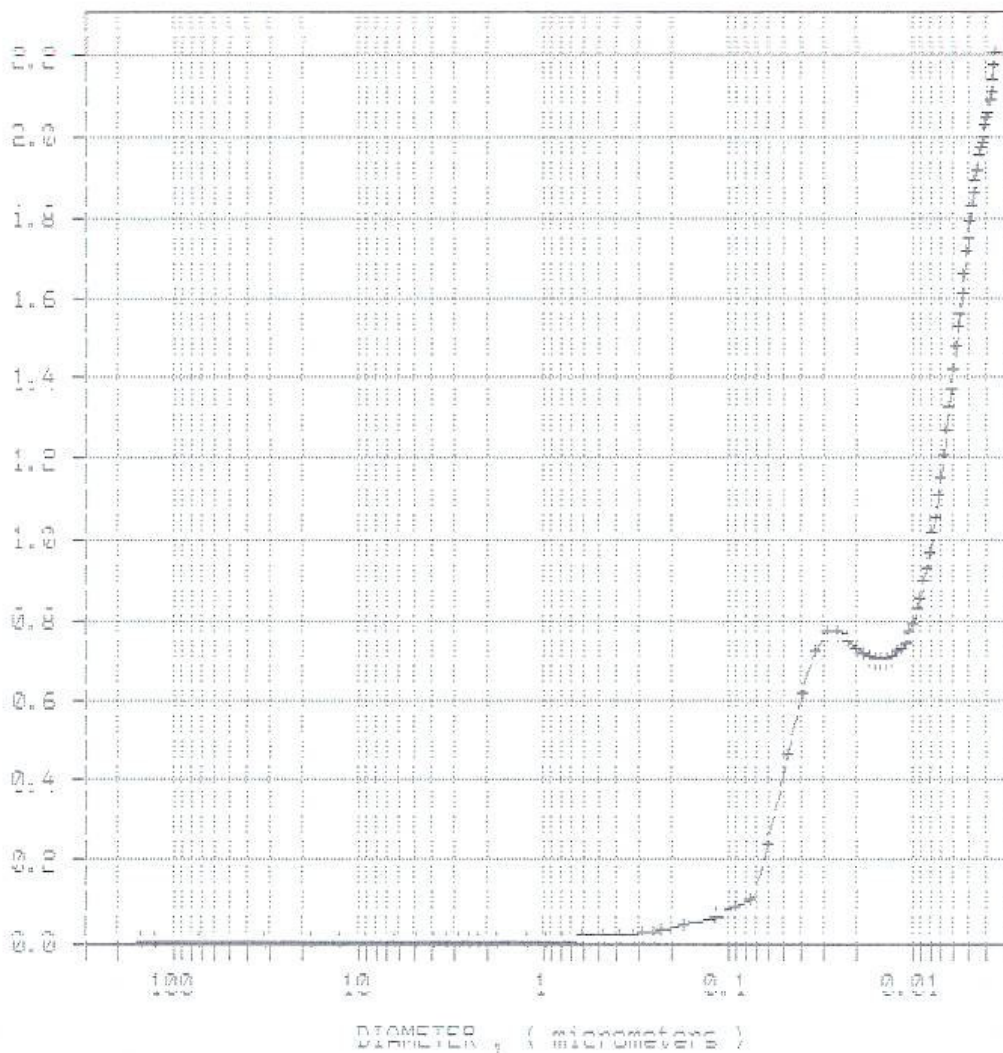
PAGE 7

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /207
OPERATOR: PAULO
SAMPLE ID: AMOSTRA 4 065 20%
SUBMITTER: MOISES

LP 11:01:36 07/10/87
HP 11:40:28 07/10/87
REP 14:23:01 07/10/87

DIFFERENTIAL INTRUSION (ml/g - μ m)

DIFFERENTIAL INTRUSION, (ml/g - μ m)



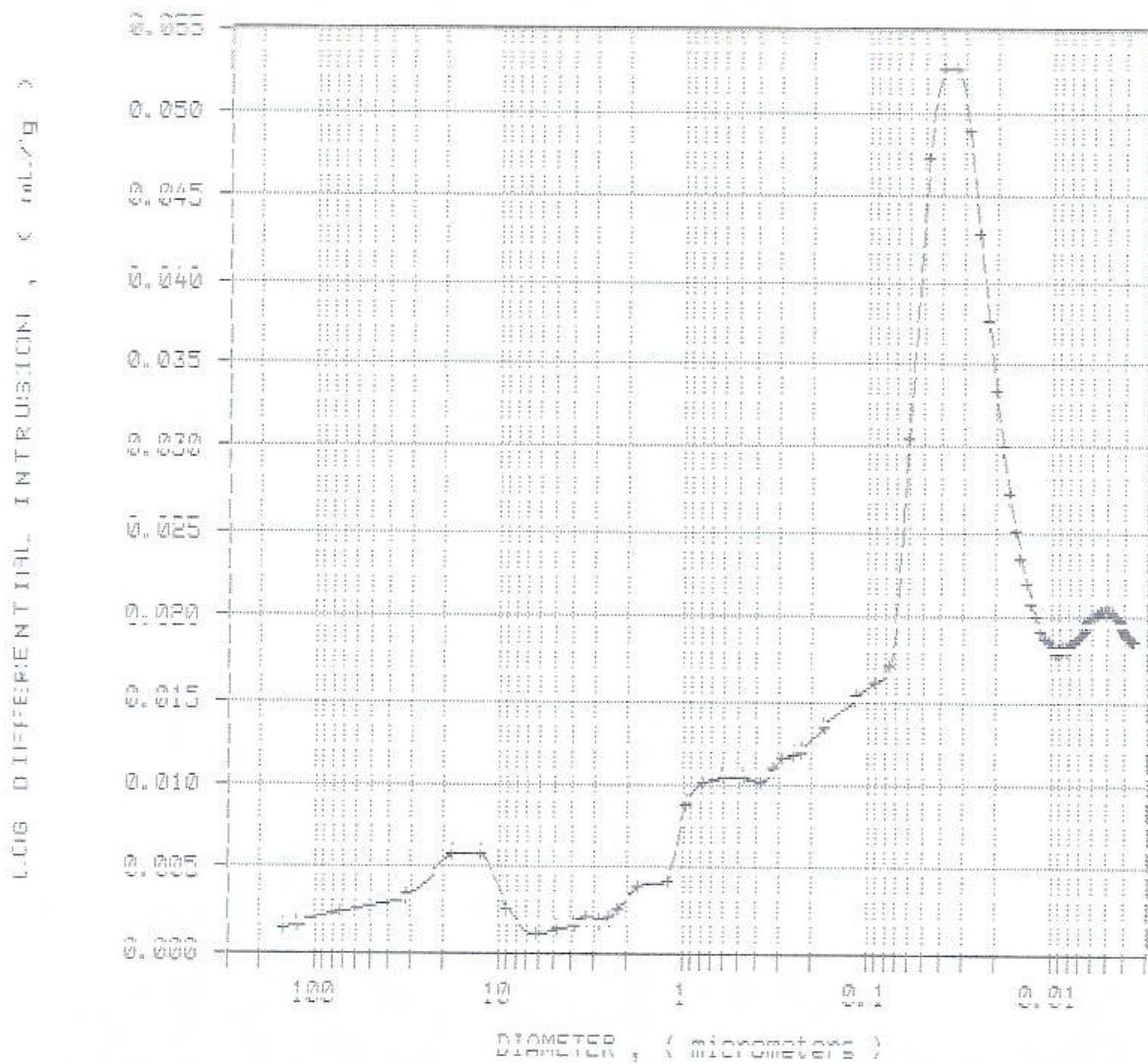
AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 8

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /207
 OPERATOR: PAULO
 SAMPLE ID: AMOSTRA 4 065 20%
 SUBMITTER: MOISES

LP 11:01:36 07/10/87
 HP 11:40:28 07/10/87
 REP 14:23:01 07/10/87

LOG DIFFERENTIAL INTRUSION vs DIAMETER
 LOG DIFFERENTIAL INTRUSION vs DIAMETER



AUTOPORE III 9410 V1.02

PAGE 9

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: 2001 /207
OPERATOR: PAULO
SAMPLE ID: AMOSTRA 4 065 20%
SUBMITTER: MOISES

LP 11:01:36 07/10/87
HP 11:40:28 07/10/87
REP 14:23:01 07/10/87

CUMULATIVE PORE AREA VS DIAMETER

CUMULATIVE PORE AREA, (cc/g)

