

Douglas Marcus de Oliveira

**RESÍDUO DE GRANITO COMO SUBSTITUIÇÃO AO
CIMENTO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Engenharia de Produção Civil

Belo Horizonte, dezembro de 2010

RESÍDUO DE GRANITO COMO SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Trabalho de Conclusão de Curso

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção Civil como requisito parcial para aprovação na disciplina Projeto de Fim de Curso

Orientador: Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Co-Orientador: Tatiana Nunes Oliveira

Belo Horizonte, dezembro de 2010

Dedico este trabalho primeiramente a Deus que possibilitou esta caminhada até aqui. Aos meus pais e irmão pelo incentivo. A Mariana pelo amor e compreensão nos momentos difíceis. E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para conclusão desta pesquisa.

Agradecimentos

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pela estrutura oferecida durante cinco anos.

Ao professor Ricardo Fiorotti, pela atenção e dedicação em transmitir parte do seu conhecimento acadêmico.

Ao professor Conrado pela disponibilidade de equipamentos para ativação mecânica do resíduo de granito.

Ao Grupo de Pesquisa RECICLOS por ter cedido seu espaço físico, equipamentos e toda sua infra-estrutura.

Ao professor José Roberto de Oliveira pela disponibilidade e auxílio na condução dos experimentos especializados para caracterização do resíduo de granito.

A Mestranda Tatiana pela atenção, conselhos e pela cessão do material que foi pesquisado.

A todos os Mestres e Doutores que possibilitaram meu crescimento profissional e pessoal.

Ao meu pai Antônio por ser o meu maior exemplo de responsabilidade e honestidade.

A minha mãe Maria por ser o meu maior exemplo de fidelidade e perseverança.

A Mariana, minha futura esposa, pelo amor dedicado durante estes cinco de estudo.

A todos os servidores do CEFET, em especial ao Leandro, pela cordialidade e disponibilidade oferecida durante os ensaios laboratoriais

A todos que me deram força e me ajudaram de alguma forma, recebam o meu agradecimento.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein.

“Faça as coisas o mais simples que puder, porém não as mais simples.”

Albert Einstein

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa.....	2
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivos Gerais.....	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Rochas Ornamentais.....	4
3.1.1. Lavra de Matacões	7
3.1.2. Lavra de Maciços Rochosos	8
3.1.3. Beneficiamento Primário	10
3.1.3.1. Tear de Lâminas.....	10
3.1.3.2. Talha-bloco de Discos Diamantados	11
3.1.3.3. Fios Diamantados.....	12
3.1.4. Geração de Resíduos	13
4. MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1. Cimento.....	15
4.2. Massa Específica	15
4.3. Areia.....	16
4.3.1. Composição Granulométrica.....	17
4.3.2. Massa Específica.....	17

4.3.3. Teor de Umidade	18
4.4. Resíduo de Granito	18
4.4.1. Ativação Mecânica.....	20
4.4.2. Análise Granulométrica.....	20
4.4.3. Composição Química e Mineralógica.....	21
4.4.4. Massa Específica.....	21
4.4.5. Índice de Atividade Pozolânica	21
4.5. Matriz Cimentícia.....	22
4.5.1. Dosagem	22
4.5.2. Densidade de Massa no Estado Endurecido.....	23
4.5.3. Resistência à Compressão Axial.....	24
4.5.3.1. Moldagem e Preparação dos Corpos-de-prova	24
4.5.3.2. Determinação da Carga de Resistência à Compressão.....	25
4.5.4. Resistência à Tração na Flexão.....	26
4.5.4.1. Moldagem e Preparação dos Corpos-de-prova	26
4.5.4.2. Determinação da Carga de Resistência à Tração na Flexão	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1. Caracterização do Agregado Miúdo	29
5.1.1. Distribuição Granulométrica.....	29
5.1.2. Massa Específica.....	30
5.1.3. Teor de Umidade	30
5.2. Caracterização do Cimento	31
5.2.1. Massa Específica.....	31
5.3. Caracterização do Resíduo de Granito.....	31
5.3.1. Massa Específica.....	31
5.3.2. Distribuição Granulométrica.....	32
5.3.3. Composição Química e Mineralógica.....	34
5.3.4. Índice de Atividade Pozolânica (IAP)	35

5.4. Caracterização da Matriz Cimentícia	36
5.4.1. Densidade da Massa no Estado Endurecido.....	36
5.4.2. Resistência à Compressão Axial.....	37
5.4.3. Resistência à Tração na Flexão.....	39
6. CONCLUSÃO.....	41
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	42
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
9. ANEXOS.....	46

RESUMO

A reciclagem de resíduos sólidos tem sido tema freqüente nos últimos anos e por esse motivo propõe-se como contribuição o reaproveitamento do resíduo de granito de forma sustentável aplicado como adições a matrizes cimentícias. Os resíduos gerados na indústria de rochas ornamentais, tanto na etapa de desdobramento quanto na de acabamento, são pouco reaproveitados e dispostos no meio ambiente de forma inadequada. O presente trabalho tem como objetivo analisar o resíduo gerado na etapa de corte de blocos e chapas (lama) de granito, bem como avaliar as propriedades mecânicas de uma matriz produzida com substituições de parte do cimento Portland por esse resíduo. Para tanto foram moldados corpos de prova de matrizes com diferentes combinações de teores de substituição do cimento por resíduo de granito (10% e 20%), em volume, e tempo de ativação mecânica (12 e 24 horas), comparando-se com a matriz referência. Para cada idade das matrizes (1, 3, 7 e 28 dias) realizaram-se ensaios mecânicos, tais como, resistência à compressão uniaxial e resistência a tração na flexão. Os resultados mostraram que o resíduo não possui característica pozolânicas e que as resistências mecânicas ficaram aquém da matriz referência.

Palavras Chave

Ativação Mecânica, Matriz Cimentícias, Reciclagem, Resíduo de Granito.

ABSTRACT

The recycling of solid waste has been a frequent theme in recent years; therefore it is suggested that granite wastes may also be used as additives in cementitious matrices for sustainability purposes. . The residue generated in the industry of ornamental rocks, both in the stage of unfolding and finishing, is inadequately discharged into the environment. The present work has as objective to analyze the residue generated in the stage of granite plate cut, as well as evaluating the mechanical properties of a matrix produced with replacement of Portland cement with this residue. Samples with different substitution levels of the Portland cement with granite residue (10% and 20%) were prepared and the mechanical strength (compressive and flexural strength) compared with a reference matrix without substitution at 1, 3, 7 and 28 days. The results showed that the residue does not have pozzolanic effect and the mechanical strength is significantly lower than that of the reference matrix.

Keywords

Activation Mechanics, Cementitious Matrices Granite Recycling, Residue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Países Destinos das Exportações Brasileiras	5
Figura 3.2 – Principais Núcleos de Reserva e Beneficiamento do ES.....	6
Figura 3.3 – Lavra de Matacões.	7
Figura 3.4 – Lavra por bancadas.	8
Figura 3.5 – Lavra em fossa	9
Figura 3.6 – Lavra subterrânea.....	9
Figura 3.7 – Tear de Multi-lâminas.....	11
Figura 3.8 – Talha-bloco com Discos Diamantados.	12
Figura 3.9 – Corte com Fios Diamantados.....	12
Figura 3.10 – Processos de Desdobramento de Rochas Ornamentais.	13
Figura 3.11 – Tanque de Decantação de Resíduos.	14
Figura 4.1 – Ensaio de Massa Específica do Cimento.	16
Figura 4.2 – Ensaio de Massa Específica Areia.	18
Figura 4.3 – Resíduo de Granito Úmido.....	19
Figura 4.4 – Resíduo de Granito Seco.....	19
Figura 4.5 – Ativação Mecânica.....	20
Figura 4.6 – Máquina de preparação da argamassa.....	22
Figura 4.7 – Ensaio da densidade da massa no estado endurecido.	24
Figura 4.8 – Moldagem e Preparação CP`s para Ensaio de Compressão.	25
Figura 4.9 – Ensaio de resistência à compressão axial.....	26
Figura 4.10 – Moldagem e Preparação CP`s para Ensaio de Tração na Flexão.....	27
Figura 4.11 – Ensaio de resistência à tração na flexão.	28
Figura 5.1 – Curva Granulométrica da Areia.....	30
Figura 5.2 – Comparação Massa Específica da Areia, Cimento e Resíduos de Granito	31
Figura 5.3 – Composição Granulométrica do RGN	32
Figura 5.4 – Composição Granulométrica do RGAM12	33
Figura 5.5 – Composição Granulométrica do RGAM24	33
Figura 5.6 – Índice de Atividade Pozolânica	35
Figura 5.7 – Gráfico Comparativo da Densidade da Massa no Estado Endurecido	36
Figura 5.8 – Gráfico Comparativo Referência x RGN (Compressão).....	37
Figura 5.9 – Gráfico Comparativo Referência x RGAM12 (Compressão).....	38
Figura 5.10 – Gráfico Comparativo Referência x RGAM24 (Compressão).....	38
Figura 5.11 – Gráfico Comparativo Referência x RGN (Tração).	39

Figura 5.12 – Gráfico Comparativo Referência x RGAM12 (Tração).....	40
Figura 5.13 – Gráfico Comparativo Referência x RGAM24 (Tração).....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Componente do cimento Portland de alta resistência inicial	15
Tabela 5.1 – Porcentagem em massa retida acumulada da Amostra	29
Tabela 5.2 – Módulo de Finura, Dimensão Máx. e Mat. Pulverulento	29
Tabela 5.3 – Exigências Físicas Materiais Pozolânicos	32
Tabela 5.4 – Análise Química do Resíduo de Granito.....	34
Tabela 5.5 – Exigências Químicas Materiais Pozolânicos	34
Tabela 5.6 – Resultados Resistência à Compressão Axial (IAP)	35
Tabela 5.7 – Resultados Resistência à Compressão Axial	37
Tabela 5.8 – Resultados Resistência à Tração na Flexão	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARI – Alta Resistência Inicial

BA – Bahia

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CP – Cimento Portland

Cp – Corpo-de-prova

ES – Espírito Santo

IAP – Índice de Atividade Pozolânica

IFES – Instituto Federal do Espírito Santo

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

MG – Minas Gerais

PROPEMM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

RCG – Resíduo de Corte de Granito

RECICLOS – Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos Industriais CNPq

RGN – Resíduo de Granito In Natura

RGAM12 – Resíduo de Granito Ativado Mecanicamente por 12 horas

RGAM24 – Resíduo de Granito Ativado Mecanicamente por 24 horas

SEES-BA – Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

$^{\circ}\text{C}$ – graus celsius

cm – centímetro

cm^3 – centímetro cúbico

dm^3 – decímetro cúbico

g – grama

g / cm^3 – grama por centímetro cúbico

kg – kilograma

kg / m^3 – kilograma por metro cúbico

MPa – megapascal

MPa/s – megapascal por segundo

mm - milímetro

m^3 - metro cúbico

N – newton

N/s – newton por segundo

% – percentual

ρ – densidade

γ – massa específica

1. INTRODUÇÃO

O ramo de rochas ornamentais tem características semelhantes à uma indústria tradicional. Trata-se de uma atividade extrativa cujos traços mais relevantes são: o processamento de recursos naturais; o baixo investimento tecnológico e a reduzida exigência em termos de escala mínima de produção (SPÍNOLA; GUERREIRO; BAZAN, 2004).

As rochas ornamentais e de revestimento, também chamadas pedras naturais, rochas lapídeas e rochas dimensionais, do ponto de vista comercial, são classificadas apenas em mármore e granito. Estas categorias correspondem a 90% da produção mundial. Os demais tipos são as ardósias, quartzitos, pedra sabão, serpentinitos, basaltos e conglomerados naturais (PEITER *et al*, 2001).

Apesar do grande potencial econômico da indústria de rochas ornamentais, esta gera a cada ano toneladas de resíduos que são liberados no meio ambiente de forma indiscriminada e prejudicial. Dentre estes resíduos produzidos, a “lama de granito” que é proveniente da serragem e polimento de chapas, é depositada em tanques de decantação ou rejeitada diretamente no meio ambiente. Menezes *et al*. (2002) e Gonçalves *et al*. (2002) comprovam que esta lama pode ser reaproveitada em materiais cerâmicos e de concreto de forma sustentável.

McDonough (2006) e a Comissão Mundial para o Ambiente e o Desenvolvimento (1987) desenvolvimento sustentável definiram sustentabilidade como a qualidade de satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras para satisfazer as suas próprias.

No universo da construção civil o conceito de desenvolvimento sustentável está intimamente ligado ao desenvolvimento de construções sustentáveis. Santo (2010) afirma que a construção sustentável consiste num sistema construtivo que promove alterações conscientes, de forma a atender a necessidades de edificação, habitação e utilização, e ainda preservar o meio ambiente bem como os recursos naturais, a fim de garantir a qualidade de vida para as gerações atuais e futuras.

1.1. Justificativa

Observa-se que o volume de resíduos inorgânicos gerados a cada ano vem crescendo em todo mundo e apresenta um dos maiores problemas da sociedade moderna. Tradicionalmente esses resíduos são descartados indiscriminadamente no meio ambiente ou depositados em aterros. Todavia, alternativas de reciclagem e reutilização devem ser sempre pensadas como as primeiras alternativas para o seu gerenciamento. Portanto faz-se necessário realizar este estudo a fim de buscar introduzi-los novamente no ciclo produtivo da construção civil.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Avaliar a viabilidade técnica da utilização do resíduo de corte de granito na construção civil como substituição ao cimento em matrizes cimentícias.

2.2. Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

Ativar mecanicamente o resíduo em um Moinho de Bolas;

Caracterizar química e fisicamente o resíduo;

Produzir matriz cimentícia com adição de resíduo processado em substituição ao cimento.

Determinar as características mecânicas (resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão) da argamassa produzida.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Rochas Ornamentais

As rochas ornamentais são basicamente subdivididas do ponto de vista comercial, em granitos e mármore. Os granitos correspondem às rochas silicáticas, enquanto os mármore englobam as rochas carbonáticas. Alguns outros tipos incluídos no campo das rochas ornamentais são os quartzitos, serpentinitos, travertinos e ardósias. (ABIROCHAS, 2010).

Segundo FILHO (2006), as rochas ornamentais são utilizadas como revestimento interno e externo de paredes, pisos, pilares e outras formas de acabamento. Servem também como matéria-prima para peças isoladas de estruturas, tampos e pés de mesa, balcões, lápides e arte funerária em geral, além de edificações.

Segundo MONTANI (2005 apud FILHO, 2006), o mercado mundial de rochas ornamentais e de revestimento tem alcançado taxas médias anuais de 7% de aumento na produção. A indústria extrativa global de pedras naturais evoluiu do nível de produção de 1,8 milhões de toneladas na década de 20 do século passado, para 81,25 milhões de toneladas no ano de 2004, quando mármore, granitos e outros tipos de rochas constituíram, respectivamente, 53,9%, 40,6%, 5,5% da produção mineral mundial.

O mercado mundial de rochas ornamentais produz aproximadamente 55 milhões de toneladas/ano e movimenta cerca de US\$ 40 bilhões/ano em rochas brutas e processadas. O Brasil está inserido neste contexto com uma produção média anual de 5,2 milhões de toneladas, menos de 10% da produção mundial, e uma movimentação de US\$ 2,1 bilhões/ano, possuindo os Estados Unidos como seu maior consumidor (Fig. 3.1). Mesmo com esses números aparentemente expressivos, a participação do Brasil no mercado internacional de rochas processadas é pequena em relação aos seus principais concorrentes, China e Índia. No âmbito regional os Estados de Minas Gerais (MG), Espírito Santo (ES) e Bahia (BA) correspondem a 80% da produção brasileira, com a liderança do Estado do Espírito Santo (PEITER *et al.* 2001).

Principais Destinos das Exportações Brasileiras (US\$ milhões) - 1999

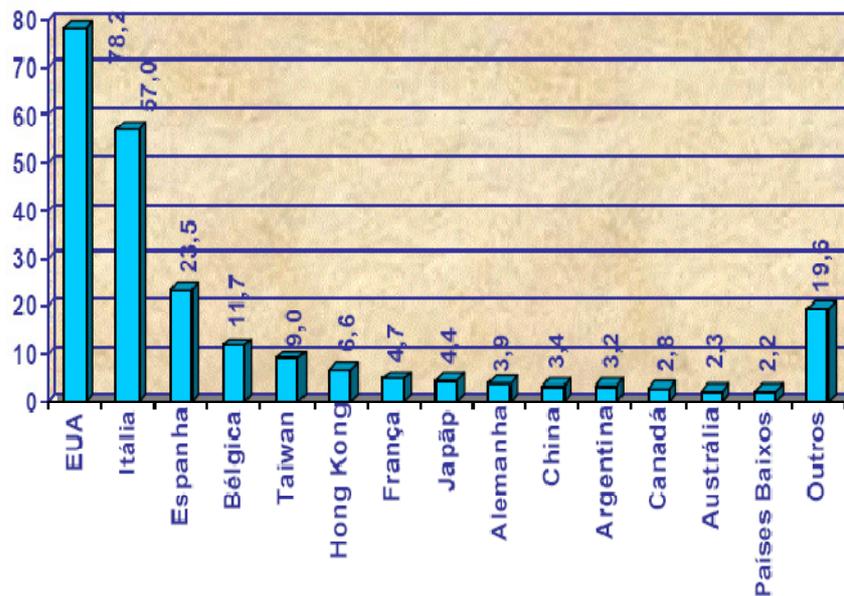


Figura 3.1 – Países Destinos das Exportações Brasileiras (ABIROCHAS, 2010)

Atividades produtivas de extração e beneficiamento estão presentes em grande parte dos municípios capixabas, destacando-se um conjunto de municípios na região noroeste e outro na região sul (Fig. 3.2), ABIROCHAS (2010).

De acordo com KASCHNER (2004), o Estado do Espírito Santo tem grande importância no setor de rochas ornamentais, dado que 1.137 dos 1.500 teares existentes no Brasil encontram-se neste Estado. Além disso, 900 foram nele projetados, desenvolvidos e fabricados. O autor ainda afirma que este Estado possuía menos de dez empresas exportadoras em 1996 e atualmente possui mais de 250.

Como a competitividade no mercado de rochas ornamentais está intimamente ligada à tecnologia, o investimento em pesquisa neste setor é de extrema importância para o Brasil alcançar melhores posições no mercado internacional.

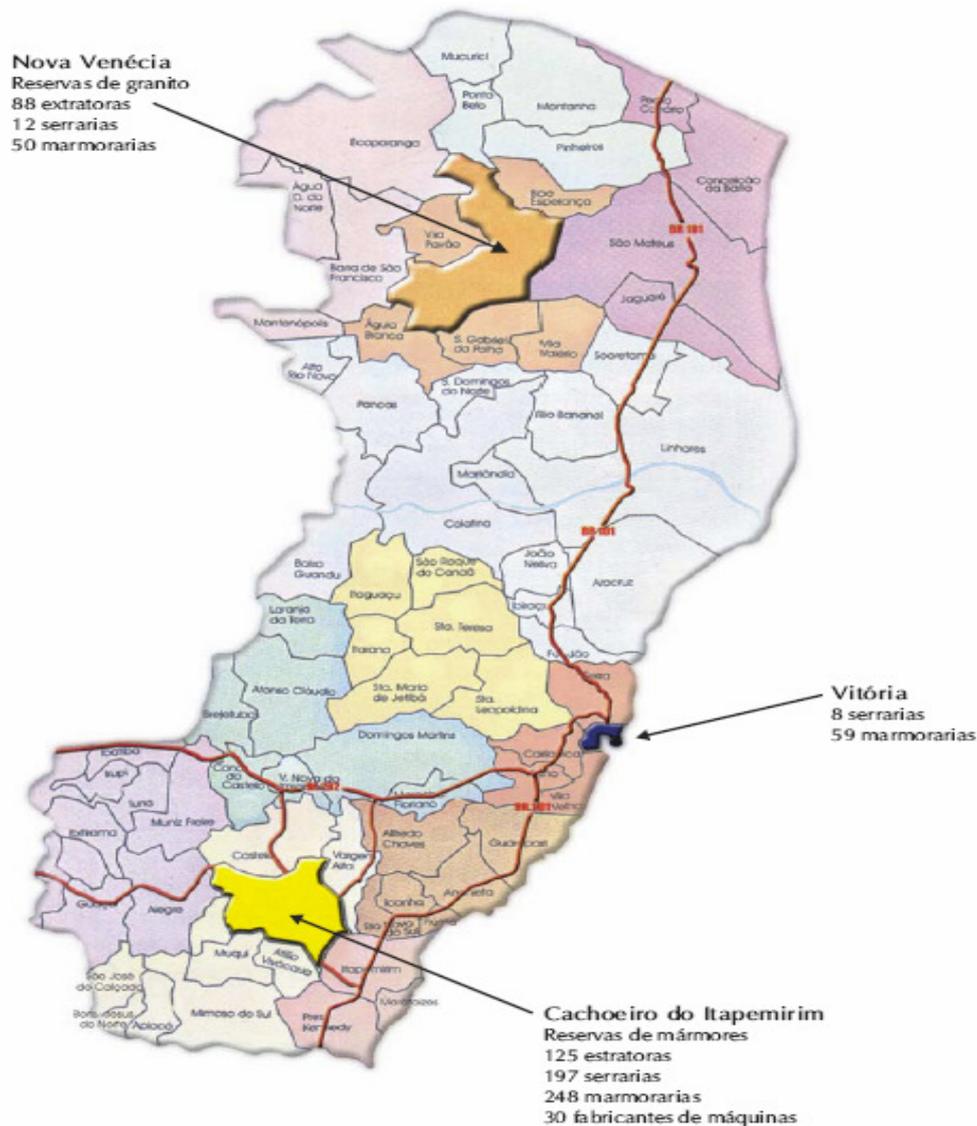


Figura 3.2 – Principais Núcleos de Reserva e Beneficiamento do ES (SEES – BA, 2010).

A extração das rochas ornamentais inicia-se com a realização de uma pesquisa de solo, onde se levanta o potencial e qualidade das rochas, dentre outras características. Esta etapa torna-se de fundamental importância para as etapas subsequentes e deve ser feita por profissionais qualificados, geralmente geólogos e engenheiros de minas. Todo este estudo preliminar precisa ser baseado em critérios técnicos, condicionantes geológicas (regionais e locais), estimativas de reservas e constituintes físico-química da rocha que deliberam sobre a viabilidade da lavra, ou concluem sobre a melhor forma de extração, evitando perdas e conseqüentemente menores impactos. Para MATTÁ (2003), as lavras de rochas ornamentais são geralmente executadas a céu aberto, mas existem extrações subterrâneas. Ainda de

acordo com o autor são dois os tipos de extração das rochas ornamentais: a lavra de matacões e a lavra de maciços rochosos.

3.1.1. Lavra de Matacões

MATTA (2003) define matacões como corpos de rocha arredondados, que se destacam do maciço rochoso devido ao intemperismo físico, químico e biológico ao longo de grandes períodos na escala geológica. Todo esse processo é denominado esfoliação esferoidal.

A lavra é realizada em várias frentes, geralmente próxima por motivos econômicos, devendo os matacões apresentar dimensões apropriadas e quantidades suficientes que permitam o desdobramento de um número razoável de blocos. As dimensões viáveis economicamente dos corpos precisam ser na ordem de dezenas de metros cúbicos. No entanto, volumes de 6 ou 7m³ podem ser lavrados com lucro quando são constituídos por material de alto valor. (MATTA, 2003).

Segundo SOUSA (2007) as atividades de extração envolvem a marcação de furos para detonação, perfuração, colocação de explosivos, detonação e, posteriormente, enquadramento dos blocos, utilizando-se processos de afeiçoamento manual aproveitando as direções de clivagem naturais da rocha, como pode ser visto na Fig. 3.3.



Figura 3.3 – Lavra de Matacões (MATTA, 2003).

3.1.2. Lavra de Maciços Rochosos

Os maciços rochosos são grandes massas de rochas provenientes da materialização do magma que se resfria durante os períodos geológicos e emergem na superfície devido à erosão (MATTA, 2003).

Ainda segundo MATTA (2003), ao contrário dos matacões, a lavra nos maciços precisa de uma maior aplicação de técnicas de extração. Os maciços rochosos proporcionam mais segurança na produção de um material qualquer, pois são mais acessíveis a um planejamento de extração e porque possuem um maior controle quantitativo e qualitativo da produção.

Existem cinco formas de extrair rochas de um maciço rochoso (MATTA, 2003). Esses métodos são:

- Lavra por bancadas (Fig. 3.4);
- Lavra por painéis verticais;
- Lavra por desmoronamento;
- Lavra em fossa ou poço (Fig. 3.5);
- Lavra subterrânea (Fig. 3.6).



Figura 3.4 – Lavra por bancadas (MATTA, 2003).



Figura 3.5 – Lavra em fossa (MATTA, 2003).



Figura 3.6 – Lavra subterrânea (MATTA, 2003).

Segundo FILHO (2006) e SOUSA (2007) o processo de beneficiamento de rochas ornamentais é subsequente ao da lavra e realizado através de duas etapas: beneficiamento primário e secundário.

3.1.3. Beneficiamento Primário

Conhecido por desdobragem ou serragem, este beneficiamento corresponde ao processo de corte dos blocos em chapas com espessuras variadas e próximas daquelas destinada ao mercado consumidor. Representa o primeiro passo em relação à agregação de valor ao material proveniente das pedreiras. (SOUSA, 2007).

FILHO (2006) define que para este primeiro beneficiamento são utilizadas três tecnologias de corte: tear de lâminas, talha-bloco de discos diamantados e o fio diamantado.

3.1.3.1. Tear de Lâminas

Segundo STELLIN Jr. (1998, apud GONÇALVES, 2000), a tecnologia do corte dos blocos realizados com teares é a mais difundida devido à maior flexibilidade, elevada produtividade, custo relativamente mais reduzido, além de uma boa relação custo/benefício do investimento inicial.

Os teares são equipamentos vigorosos que possuem quatro colunas de sustentação e um quadro que realiza movimentos pendulares. Esse quadro possui múltiplas lâminas de aço carbono, dispostas longitudinalmente, umas paralelas as outras (Fig. 3.7). Coloca-se o bloco sob o quadro, e o movimento oscilatório faz o processamento do corte. Para otimização do corte e resfriamento das lâminas o bloco é molhado por uma polpa abrasiva cuja composição é água (como elemento lubrificante), granalha de aço como um sistema abrasivo e cal para evitar a oxidação (SOUSA, 2007).



Figura 3.7 – Tear de Multi-lâminas (FILHO, 2006).

3.1.3.2. Talha-bloco de Discos Diamantados

Segundo SOUSA (2007), nesses equipamentos o corte dos blocos é realizado por discos diamantados, de diâmetros variáveis, com competência para cortes de grandes profundidades. FILHO (2006) descreve esta máquina de desdobramento de blocos com uma estrutura de sustentação por colunas metálicas/concreto que suportam uma trave ou ponte, na qual estão instalados o mandril e o conjunto de acionamento dos discos (Fig. 3.8).

A utilização desses equipamentos é recente e pouco difundida em relação aos teares. São apropriados para determinados tipos de desdobramentos e sua aplicação só foi possível devido ao avanço tecnológico de diamantes em ferramentas de cortes e com a diminuição dos custos das máquinas diamantadas. (FILHO, 2006).

Segundo CHIODI FILHO (1995, apud FILHO, 2006), os talha-blocos têm uma produtividade 10 % maior que os teares, em média. O autor ainda frisa que os blocos podem ser desdobrados em várias formas, devido a sua movimentação nos mais variados ângulos, e por isso são mais versáteis que os teares.



Figura 3.8 – Talha-bloco com Discos Diamantados (FILHO, 2006).

3.1.3.3. Fios Diamantados

FILHO (2006) salienta que o funcionamento do equipamento de corte com fio diamantado é bastante simples. Ele é constituído de um conjunto de polias acionadas por um motor, o qual imprime uma velocidade e um tensionamento ao fio diamantado (Fig. 3.9). KASCHNER (1996, apud FILHO, 2006) evidencia que essas máquinas estão disponíveis no mercado e com seu uso corrente. Alguns fabricantes já disponibilizaram, para a indústria de desdobramentos, exemplares que permitem o corte programado em curvas e, portanto, a execução de cortes em forma e desenhos antes inimagináveis.



Figura 3.9 – Corte com Fios Diamantados (FILHO, 2006).

3.1.4. Geração de Resíduos

Os processos de extração, serragem e acabamento são responsáveis por toda a produção de resíduo gerado na industrialização de rochas ornamentais. A Fig. 3.10 demonstra todas as etapas do desdobramento, bem como todos os momentos em que são gerados os resíduos. Tais resíduos são: os resíduos da extração, os resíduos do processo de corte e serragem (RCG), e o resíduo da etapa de beneficiamento.

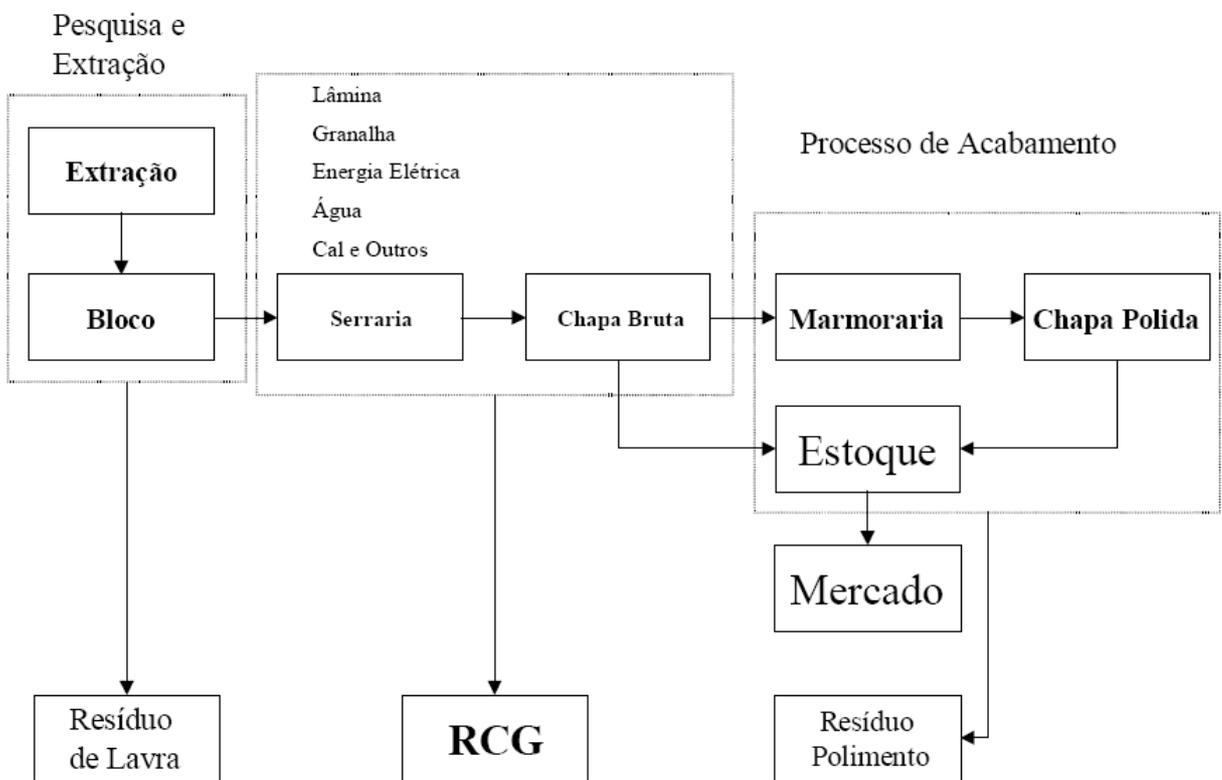


Figura 3.10 – Processos de Desdobramento de Rochas Ornamentais (GONÇALVES, 2000).

Segundo SOUSA (2007) a lama abrasiva (água, granalha, cal e rocha moída) é o principal resíduo produzido na etapa serragem de rochas ornamentais. O Estado do Espírito Santo produz aproximadamente 4.000 toneladas de rejeitos por mês. A lama abrasiva é acumulada em torno das serrarias nos tanques de decomposição (Fig. 3.11), a céu aberto, sem nenhum plano de prevenção contra os danos provocados a natureza, bem como aos mananciais de rios.



Figura 3.11 – Tanque de Decantação de Resíduos (lama) (SOUSA, 2007).

O volume de resíduo gerado pelo beneficiamento de rochas ornamentais (mármore e granito) é bastante relevante. Contudo, oscilações nestes valores existem devido às variações de demanda do mercado consumidor. O volume total do pó produzido no processo de serragem é bastante significativo, capaz de gerar problemas de transporte, estocagem, econômicos, de manutenção dos depósitos e ambiental (GONÇALVES, 2000).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Cimento

O cimento CPV - ARI é um “aglomerante hidráulico que atende as exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio”. (ABNT NBR 5733/1991). Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais carbonáticos, em teores apresentados na Tab. 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 – Componente do cimento Portland de alta resistência inicial

Componentes (% em massa)		
Sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio	Material carbonático
CPV – ARI	100 – 95	0 – 5

O cimento utilizado no experimento foi o CPV – ARI em virtude da sua alta resistência em baixas idades e também por possuir pequenas quantidades de adição mineral.

4.2. Massa Específica

A massa específica do cimento foi determinada de acordo com a ABNT NBR NM 23/2000 que prescreve o método de determinação da massa específica do cimento portland e outros materiais em pó, por meio do frasco de Le Chatelier (Fig. 4.1).

A norma especifica que o reagente a ser utilizado deve ser um líquido que não reaja quimicamente com o material e que tenha densidade igual ou superior a 0,731 g/cm³ a 15°C, e inferior à dos materiais a serem ensaiados. Portanto, o líquido escolhido para o ensaio foi o querosene que possui densidade igual a 0,8 g/cm³.

O ensaio consiste em determinar a massa específica conforme a expressão a seguir.

$$\gamma = \frac{m}{V} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (4.1)$$

Onde:

γ = massa específica do material ensaiado em g/cm³;

m = massa do material ensaiado em gramas;

V = volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2 - V_1$), em centímetros cúbicos.



Figura 4.1 – Ensaio de Massa Específica do Cimento.

4.3. Areia

O agregado miúdo empregado na produção dos corpos de prova para análise das propriedades mecânicas foi uma areia média disponível no mercado local (Praça Belo Horizonte), que se apresenta de acordo com prescrições estabelecidas pela normalização ABNT NBR 7211/2005. Para análise da atividade pozolânica do resíduo de granito foi utilizada uma areia normatizada do IPT.

4.3.1. Composição Granulométrica

O ensaio de determinação da composição granulométrica do agregado miúdo, utilizado na fabricação da argamassa, foi realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248/2003.

A NBR prescreve como massa mínima, amostra de 300g para realização do ensaio. Utilizou-se 500g da amostra de areia para o peneiramento. Estas foram secas em estufa por 24 horas e logo depois esfriadas à temperatura ambiente. Após este procedimento a amostra foi peneirada e posteriormente realizada a pesagem das quantias retidas em cada peneira. Por determinação da mesma norma, esse ensaio foi realizado duas vezes e o resultado final foi a média das duas determinações.

Obteve-se a dimensão máxima característica correspondente à abertura, em milímetros, da malha da peneira da porcentagem retida acumulada imediatamente inferior a 5% em massa. O módulo de finura foi obtido através da soma das porcentagens retidas acumuladas, nas peneiras da série normal dividido por 100.

4.3.2. Massa Específica

A determinação da massa específica do agregado miúdo foi realizada conforme as diretrizes da ABNT NBR 9776/1987, por meio da utilização do frasco de Chapman. O ensaio tem o objetivo de determinar a massa específica da amostra de acordo com a expressão abaixo.

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (4.2)$$

Onde:

γ = Massa Específica do agregado miúdo expressa em g/cm³,

L = Leitura do frasco (volume ocupado por água - agregado miúdo).

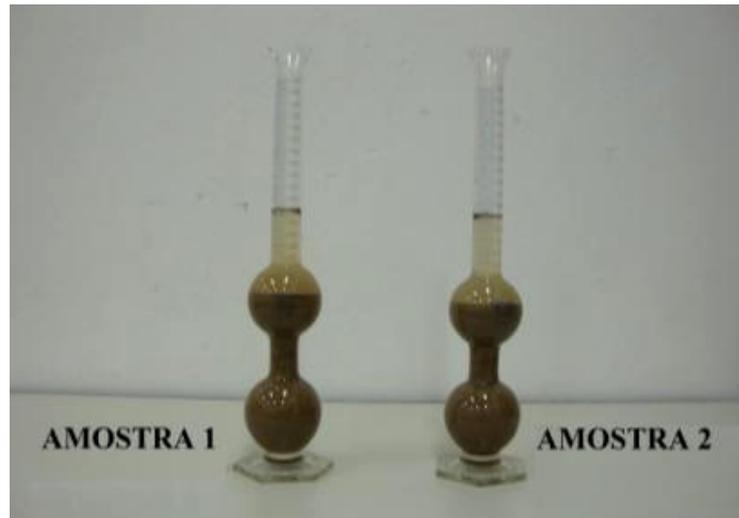


Figura 4.2 – Ensaio de Massa Específica Areia.

4.3.3. Teor de Umidade

O ensaio para a determinação do teor de umidade da amostra foi executado de acordo com a ABNT NBR 9939/1987. Conforme a norma, as amostras são pesadas em seu estado seco ao ar e também secas em estufa a 105 °C. O teor de umidade é calculado através da expressão a seguir.

$$Tu = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100 \text{ (\%)} \quad (4.3)$$

Onde:

Pu = Peso Úmido

Ps = Peso Seco

4.4. Resíduo de Granito

Foi utilizado como adição um resíduo de granito proveniente de Cachoeiro de Itapemirim, E.S., oriundo do processamento de blocos.

Tal resíduo foi colhido em pista de corte em que se processam apenas granito. A lama apresenta-se com a coloração escura, quando úmida (Fig. 4.3) e mais clara quando seca (Fig. 4.4). A amostra foi retirada após desdobramento de blocos de

granito em teares de fio diamantado (corte não metálico), assim, se apresenta ausente de granalha proveniente dos processos tradicionais de corte.

Esta amostra foi acondicionada em recipientes plásticos, identificados e lacrados em sua origem. O transporte se deu para o laboratório multiusuário do Grupo de Pesquisa RECICLOS, localizado no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG).



Figura 4.3 – Resíduo de Granito Úmido.



Figura 4.4 – Resíduo de Granito Seco.

4.4.1. Ativação Mecânica

Após a secagem do material em estufa a 105°C, a moagem do material foi realizada em um moinho de bolas cerâmico de diâmetro igual a 36cm e comprimento igual a 46cm, conforme a Fig. 4.5. A ativação mecânica se deu durante 12 e 24 horas. Obtiveram-se, assim, amostras de Resíduo de Granito Ativado Mecanicamente durante 12 horas (RGAM12) e 24 horas (RGAM24), respectivamente. Assim, as substituições foram efetuadas com três tipos de materiais: Resíduo de Granito *In Natura* (RGN), RGAM12 e RGAM24.



Figura 4.5 – Ativação Mecânica.

(a) Amostras Ativadas Mecanicamente (b) Moinho de Bolas

4.4.2. Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada com uso do equipamento Mastersizer 2000. Inicialmente a amostra foi dispersa em 50ml de água deionizada e foi levada a ultrassom em amplitude 30 por 4 minutos. Preencheu-se o compartimento de amostra com água deionizada e o material foi adicionado gradualmente até atingir a obscuração necessária para realização da medida. A dispersão foi mantida sob agitação de 1750 rpm por 30 minutos. Os parâmetros utilizados nos cálculos foram sensibilidade normal e partícula esférica. Para o cálculo das curvas de distribuição granulométrica foi utilizada a Teoria de Fraunhofer, pois se trata de uma mistura de índice de refração desconhecido. Por ser uma aproximação, essa teoria possui uma grande limitação, pois para partículas muito pequenas, o resultado apresenta erro significativo.

A análise de densidade foi realizada em um picnômetro a hélio (He) AccuPyc 1330 Pycnometer da Micrometics Instrument Corporation. A amostra foi seca em estufa a 60°C até peso constante. Na cubeta do picnômetro colocou-se volume suficiente para encher aproximadamente 1/3 da capacidade do cadinho, equivalendo ao volume calibrado, cujo peso foi determinado em balança analítica. Foram realizadas 15 purgas antes do início da leitura. O resultado obtido é decorrente da média de cinco leituras. Este método foi executado nas amostras de RGN, RGAM12 e RGAM24

4.4.3. Composição Química e Mineralógica

A composição química do resíduo de granito foi obtida por via úmida e a composição mineralógica por difração de raios x (DRX), método do pó, conduzido pelo equipamento Bruker-AXS D5005 (feixe paralelo de raios X, radiação Co K α (35 kV/40 mA; velocidade do goniômetro de 0,02° 2 θ por passo com tempo de contagem de 1,0 segundo por passo e coletados de 5 a 80° 2 θ). A interpretação qualitativa de espectro foi efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF02 (ICDD, 1996) em software Bruker Diffrac^{Plus}. O ensaio foi realizado nos laboratórios do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PROPEMM)

4.4.4. Massa Específica

A massa específica das três amostras (RGN, RGAM12 e RGAM24) foi determinada de acordo com a ABNT NBR NM 23/2000. O método utilizado foi o mesmo descrito para a determinação da massa específica do cimento.

4.4.5. Índice de Atividade Pozolânica

A determinação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cimento foi realizada de acordo com ABNT NBR 5752/1992. O método consiste na produção de duas argamassas distintas: (i) A, sem substituição do cimento, e (ii) argamassa B, com substituição de 35% do volume absoluto do cimento. O índice de consistência estabelecido é de 225 \pm 5 mm, conforme a ABNT NBR 7215/1996, e o número de

amostragem são de três corpos de prova cilíndricos (Cp`s). Neste trabalho foi moldado quatro Cp`s para cada tipo de argamassa. Como a quantidade de amostras a serem analisadas eram três, foram moldados um total de 16 Cp`s.

Após a moldagem dos Cp`s, estes foram colocadas em cura úmida durante 28 dias. Foi feito, ainda, a ruptura à compressão dos Cp`s de acordo com as recomendações da NBR 7215. O IAP é definido pela expressão abaixo.

$$IAP = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100 \quad (\%) \quad (4.4)$$

Onde:

f_{cB} = Resistência média, aos 28 dias, dos CP`s da argamassa B,

f_{cA} = Resistência média, aos 28 dias, dos CP`s da argamassa A.

4.5. Matriz Cimentícia

4.5.1. Dosagem

De acordo com as prescrições da ABNT NBR 7215/1996, os corpos de prova da matriz cimentícia foram confeccionados com o traço composto de uma parte de cimento, três de areia, em massa, e com relação água/cimento de 0,48, determinada segundo dosagens em atendimento ao espalhamento da argamassa obtida na mesa de fluxo.



Figura 4.6 – Máquina de preparação da argamassa.

4.5.2. Densidade de Massa no Estado Endurecido

O ensaio de densidade de massa no estado endurecido foi realizado segundo prescrições da ABNT NBR 13280/2005.

Para este ensaio foram usados três corpos de prova, secos a temperatura ambiente, com dimensões 4cmx4cmx16cm e 28 dias de idade. As determinações das dimensões foram adquiridas através de um paquímetro, de capacidade de 300 mm. A altura, largura e do comprimento de cada corpo-de-prova foram registradas em centímetros. Para cada CP, obtêm-se também suas respectivas massas.

O volume dos corpos-de-prova é determinado em centímetros cúbicos, a partir das medidas da largura (L), da altura (H) e do comprimento (C) através da equação apresentada a seguir.

$$V = L \times H \times C \text{ (cm}^3\text{)} \quad (4.5)$$

Onde:

L = Largura, em centímetros;

H = Altura, em centímetros;

C = Comprimento, em centímetros.

E o valor da densidade de massa no estado endurecido é conhecido através da seguinte equação.

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{M}{V} \times 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)} \quad (4.6)$$

Onde:

M = massa Cp seco a temperatura ambiente (g);

V= volume (cm³).

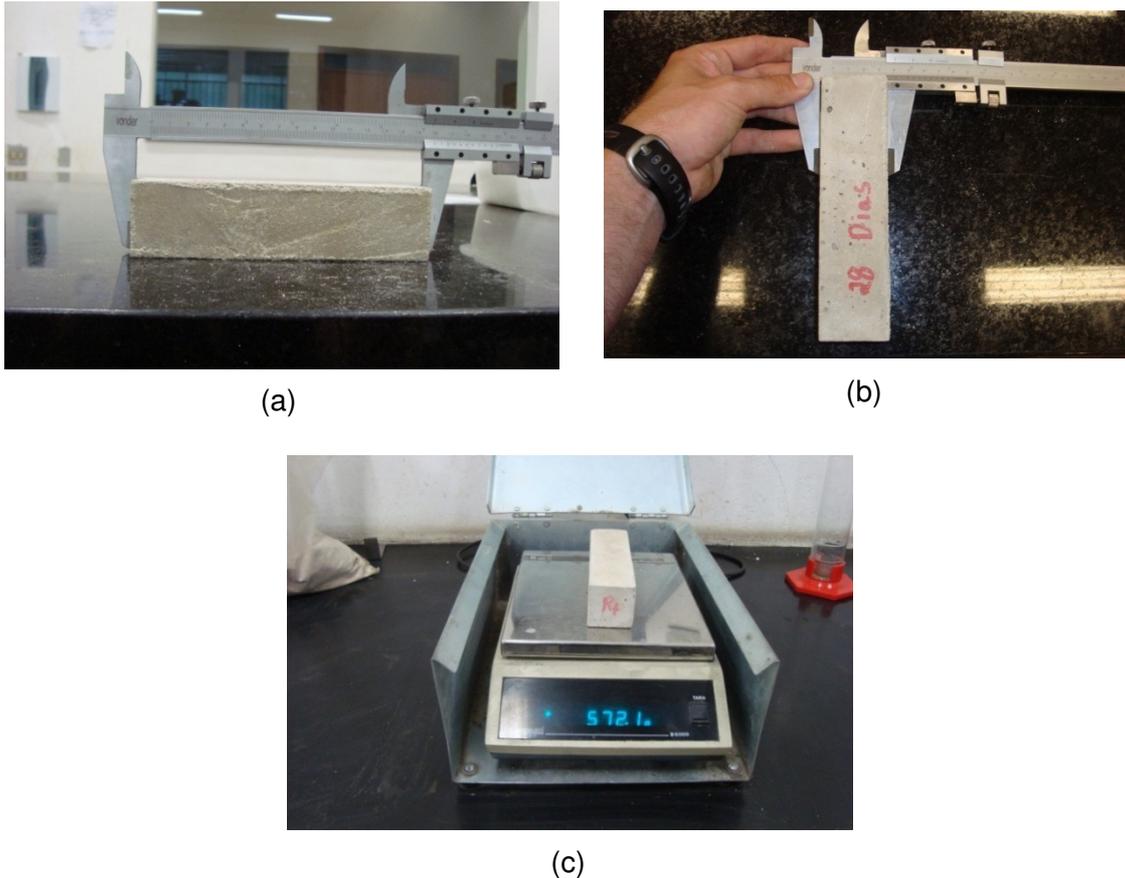


Figura 4.7 – Ensaio da densidade da massa no estado endurecido.
 (a) Medição do comprimento (b) Medição da largura (c) Medição da Massa.

4.5.3. Resistência à Compressão Axial

4.5.3.1. Moldagem e Preparação dos Corpos-de-prova

A confecção dos corpos-de-prova cilíndricos foi realizada segundo as prescrições da ABNT NBR 7215/1996. A matriz foi preparada por meio de um misturador mecânico e compactada manualmente nos moldes, preenchendo-os com quatro camadas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com um soquete.

Os moldes que contêm os corpos-de-prova foram desmoldados com 24 horas, identificados e imersos em um recipiente contendo água não corrente. Os CP's foram rompidos nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias, sendo todos devidamente capeados com uma mistura de enxofre (Fig. 4.8).

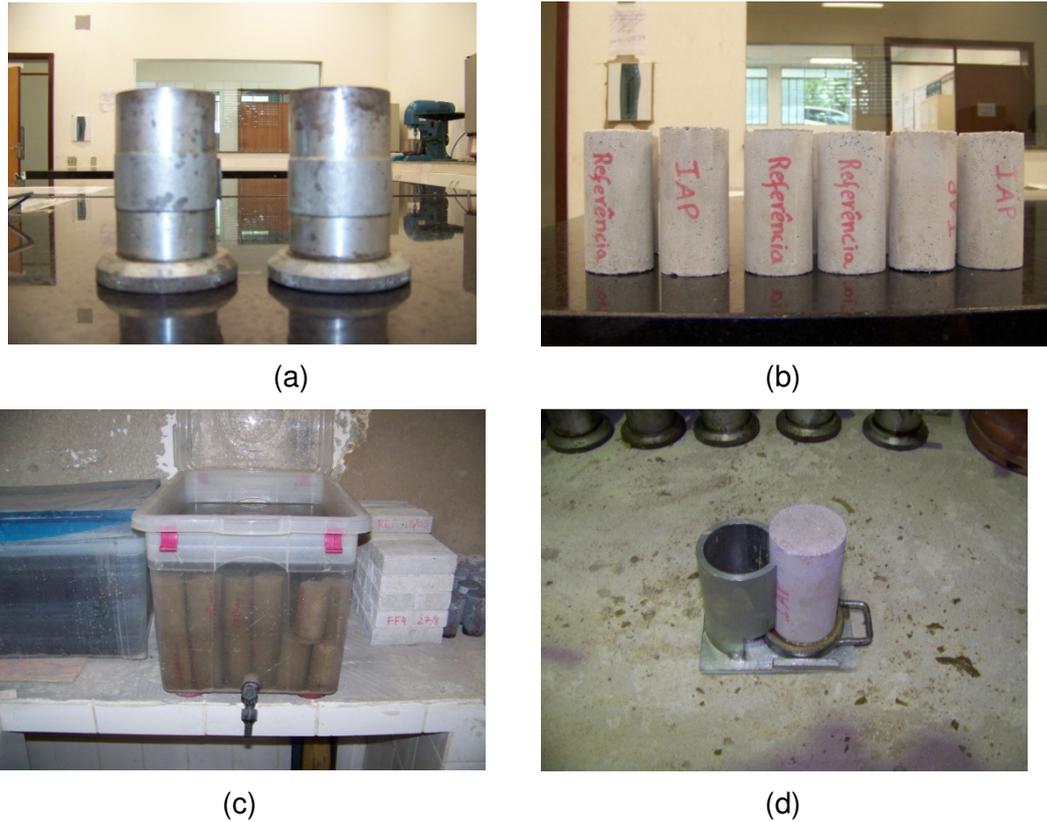


Figura 4.8 – Moldagem e Preparação CP's para Ensaio de Compressão.

(b) Moldes Cilíndricos (b) CP's Desmoldados e Identificados (c) Processo de Cura (d) Capeamento com Enxofre.

4.5.3.2. Determinação da Carga de Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos foi executado conforme a ABNT NBR 7215/1996. O método compreende na determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A velocidade do carregamento da máquina de ensaio foi equivalente a $0,25 \pm 0,05$ MPa/s. A Fig. 3.8 representa o corpo-de-prova na cápsula de rompimento e pronta para ser ensaiada. Ao usar prensas para concreto em corpos de prova de dimensões 5X10cm, corre-se o risco de romper o Cp por cisalhamento, visto que a rótula do equipamento é proporcional aos corpos de prova de 15X30 e 10X20cm. Para corrigir esse problema, emprega-se o dispositivo de RILEM com rótula apropriada para o Cp de 5X10cm. Por isso, utilizou-se este dispositivo para melhorar a transferência de carga do sistema ao Cp.



Figura 4.9 – Ensaio de resistência à compressão axial.

4.5.4. Resistência à Tração na Flexão

4.5.4.1. Moldagem e Preparação dos Corpos-de-prova

A confecção dos corpos-de-prova cilíndricos foi realizada seguindo as prescrições da ABNT NBR 13279/2005. A moldagem dos corpos-de-prova foi feita em moldes de dimensões 40 x 40 x 16 mm. O molde foi preso à mesa de adensamento e uma quantidade da matriz introduzida diretamente em cada compartimento do molde. Logo após, aplica-se 30 quedas na primeira e segunda camada, através da mesa de adensamento rasando os corpos-de-prova em seguida. Os moldes que contêm os corpos-de-prova foram desmoldados com 24 horas, identificados e imersos em um recipiente contendo água não corrente. Os CP's foram rompidos nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias (Fig. 4.10)

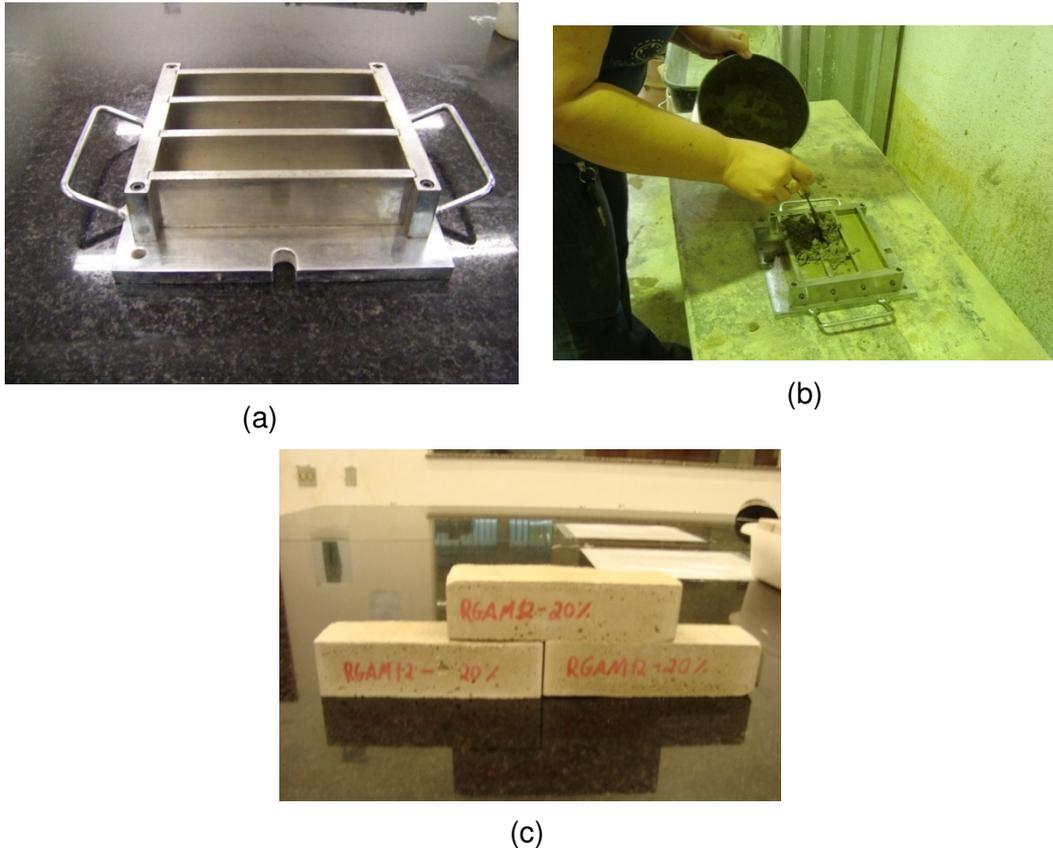


Figura 4.10 – Moldagem e Preparação CP`s para Ensaio de Tração na Flexão.
 (a) Molde Prismático (b) Moldagem CP`s (c) CP`s Desmoldados e Identificados.

4.5.4.2. Determinação da Carga de Resistência à Tração na Flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado segundo especificações da ABNT NBR 13279/2005. Os corpos-de-prova foram posicionados nos dispositivos de apoio do equipamento de ensaio que estão distantes entre si $(100,0 \pm 0,5)$ mm e a carga foi aplicada centralizadamente entre os apoios, de modo que a face rasada não entrou em contato com os dispositivos de apoio, nem com o dispositivo de carga. Aplicou-se então uma carga de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo-de-prova. A resistência à tração na flexão é calculada de acordo com a equação a seguir.

$$R_f = \frac{1,5F_f \cdot L}{40^3} \quad (\text{MPa}) \quad (4.7)$$

Onde:

R_f = resistência à tração na flexão, em MPa;

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

L = distância entre os suportes, em mm.

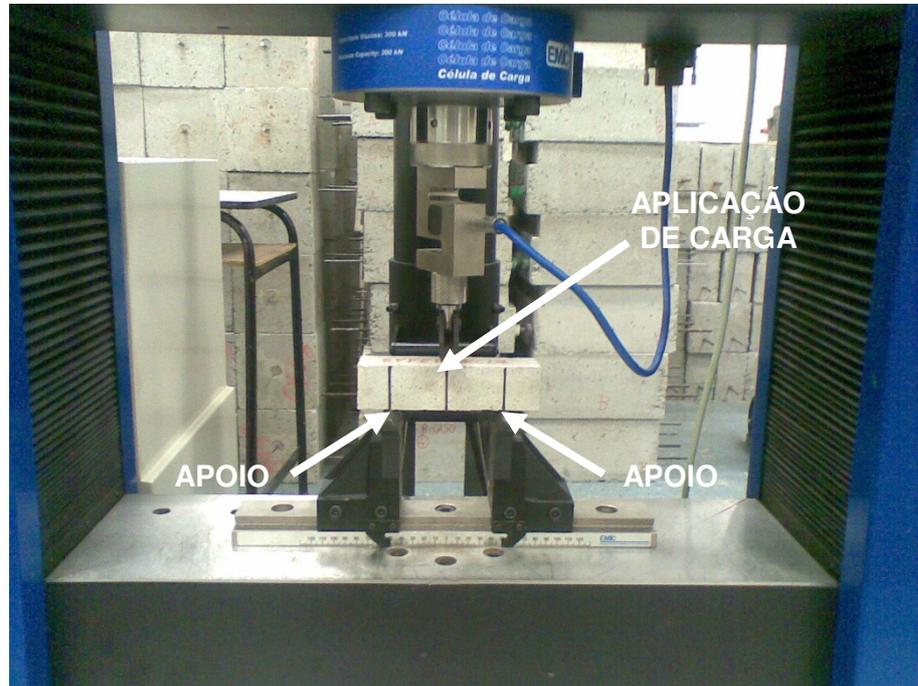


Figura 4.11 – Ensaio de resistência à tração na flexão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do Agregado Miúdo

5.1.1. Distribuição Granulométrica

Os resultados do ensaio de granulometria da amostra de areia foram obtidos de acordo com a ABNT NBR NM 248/2003 e relacionam-se à média das duas amostras analisadas, de acordo com as prescrições normativas.

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram a porcentagem média retida acumulada da areia, o módulo de finura, a dimensão máxima do agregado e o teor de material pulverulento presente na amostra. A Fig. 5.1 representa a distribuição da curva granulométrica.

Tabela 5.1 – Porcentagem em massa retida acumulada da Amostra

Peneira ABNT (mm)	<i>Porcentagem em massa retida acumulada, nas peneiras ABNT</i>				
	Zona Ótima %		Zona Utilizável %		Areia %
9.5	0%	0%	0%	0%	0%
6.3	0%	0%	0%	7%	0%
4.8	0%	5%	0%	10%	0%
2.4	10%	20%	0%	25%	1%
1.2	20%	30%	5%	50%	9%
0.6	35%	55%	15%	70%	38%
0.3	65%	85%	50%	95%	74%
0.15	90%	95%	85%	100%	93%

Tabela 5.2 – Módulo de Finura, Dimensão Máx. e Mat. Pulverulento

Módulo Finura	2,15
Dimensão. Máxima (mm)	2,4
Material Pulverulento (%)	3,4

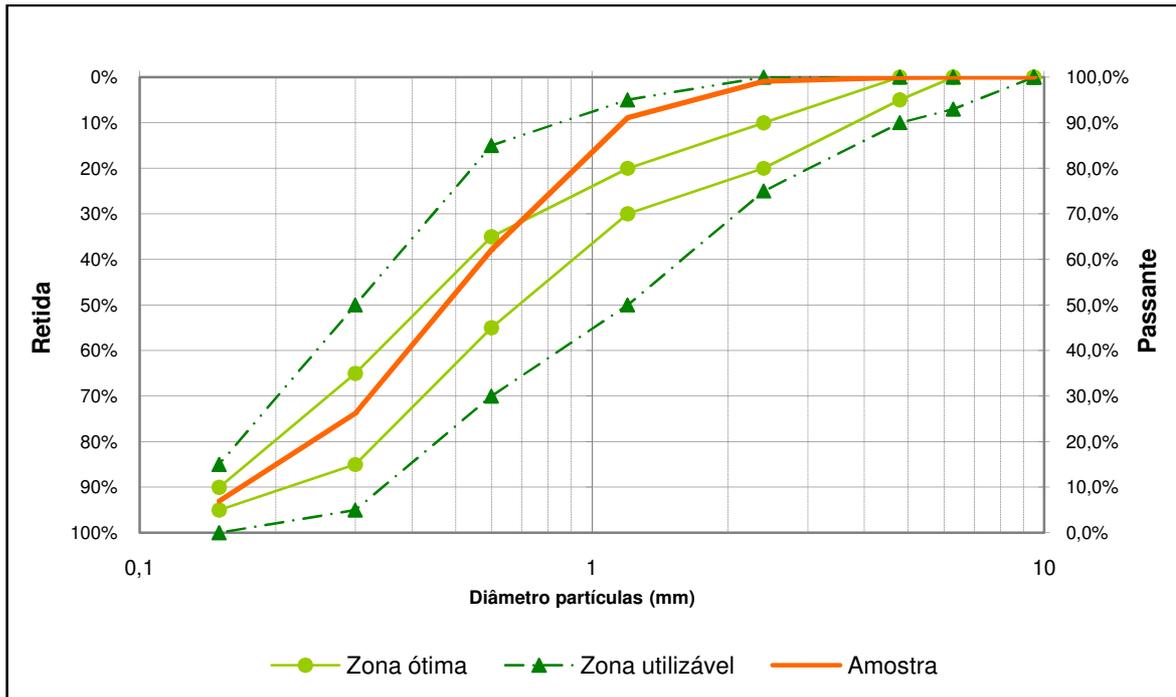


Figura 5.1 – Curva Granulométrica da Areia

A partir dos resultados pode-se concluir que a areia utilizada possui as prescrições estabelecidas pela norma ABNT NBR 7211/2005. A curva granulométrica da amostra está dentro da zona utilizável, seu módulo de finura está entre 1,55 e 2,20 e percentual de materiais pulverulentos está abaixo de 5%.

5.1.2. Massa Específica

A massa específica da areia utilizada como agregado miúdo foi obtida de acordo com a ABNT NBR 9776/1987. O resultado da massa específica foi $2,56 \text{ g/cm}^3$, que é a média de duas amostras analisadas, conforme prescrições normativas.

5.1.3. Teor de Umidade

Os resultados do ensaio para a determinação do teor de umidade das amostras foram obtidos conforme a ABNT NBR 9939/1987. O resultado do teor de umidade foi 1,16% e relaciona-se à média de três amostras analisadas, conforme prescrições normativas.

5.2. Caracterização do Cimento

5.2.1. Massa Específica

A massa específica da amostra do Cimento CPV-ARI foi obtida de acordo com a ABNT NBR NM 23/2000. O resultado foi de 3,12 g/cm³, que é a média de duas amostras analisadas, conforme prescrições normativas.

5.3. Caracterização do Resíduo de Granito

5.3.1. Massa Específica

O resultado da massa específica das amostras RGN, RGAM12, RGAM24 foram 2,63, 2,73 e 2,75 g/cm³, respectivamente. A Fig. 5.2 apresenta uma comparação entre os resultados da massa específica da areia, do cimento e dos resíduos de granito.

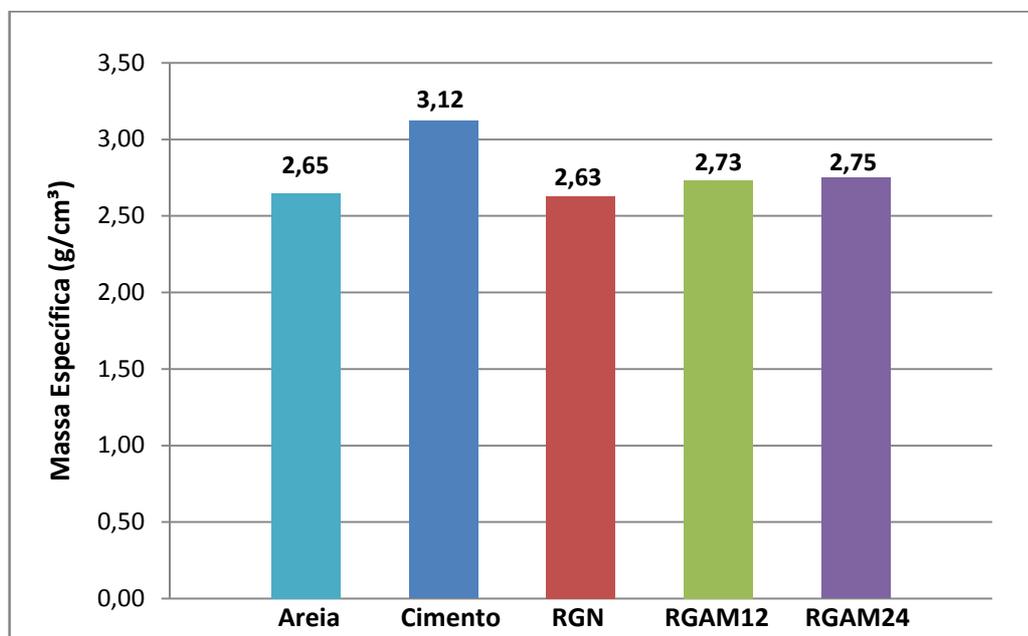


Figura 5.2 – Comparação Massa Específica da Areia, Cimento e Resíduos de Granito

Com base no gráfico percebe-se um aumento na massa específica do RGAM12 e RGAM24, em relação ao resíduo natural, devido à ativação mecânica. Verifica-se também que em relação aos tempos de ativação, 12 e 24 horas, não houve um ganho significativo nas massas específicas.

5.3.2. Distribuição Granulométrica

De acordo com a norma ABNT NBR 12653/1992, os materiais pozzolânicos podem ser classificados em três classes: pozolanas naturais (N), cinza volante (C), outras pozolanas (N).

As distribuições granulométricas das amostras de RGN, RGAM12 e RGAM 24 estão apresentadas nas Fig. 5.3, 5.4 e 5.5 a seguir. As tabelas com os volumes de cada dimensão dos grãos estão em anexo, para melhor visualização, no corpo deste trabalho.

Tabela 5.3 – Exigências Físicas Materiais Pozzolânicos

Exigências Físicas – NBR 12653			
Propriedades	Classe de Material pozzolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, % máx.	34	34	34

Adaptado da NBR 12653/1992

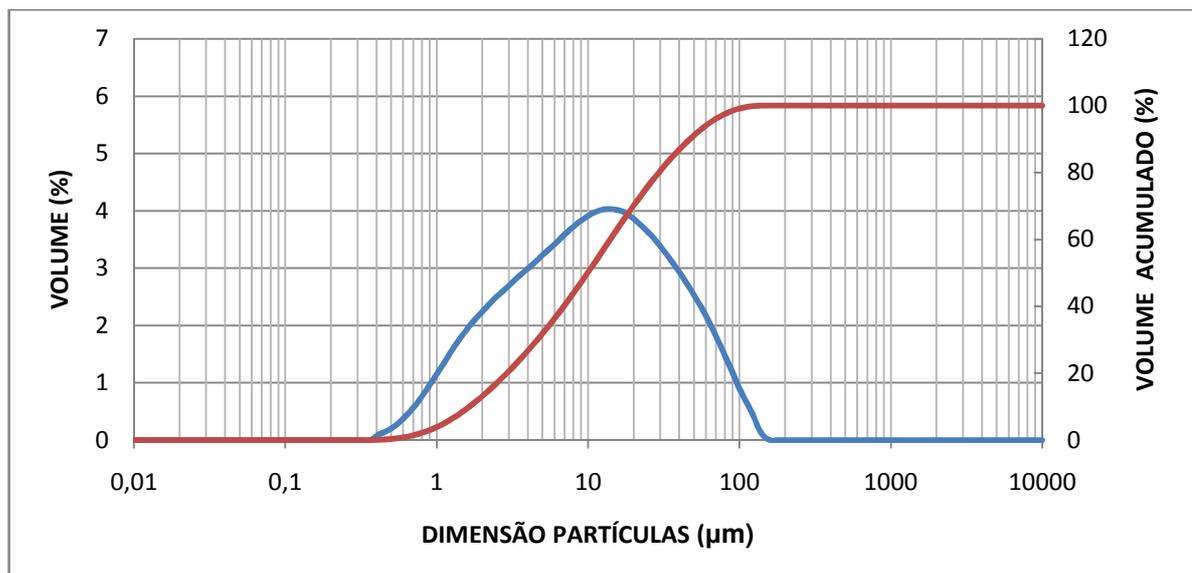


Figura 5.3 – Composição Granulométrica do RGN

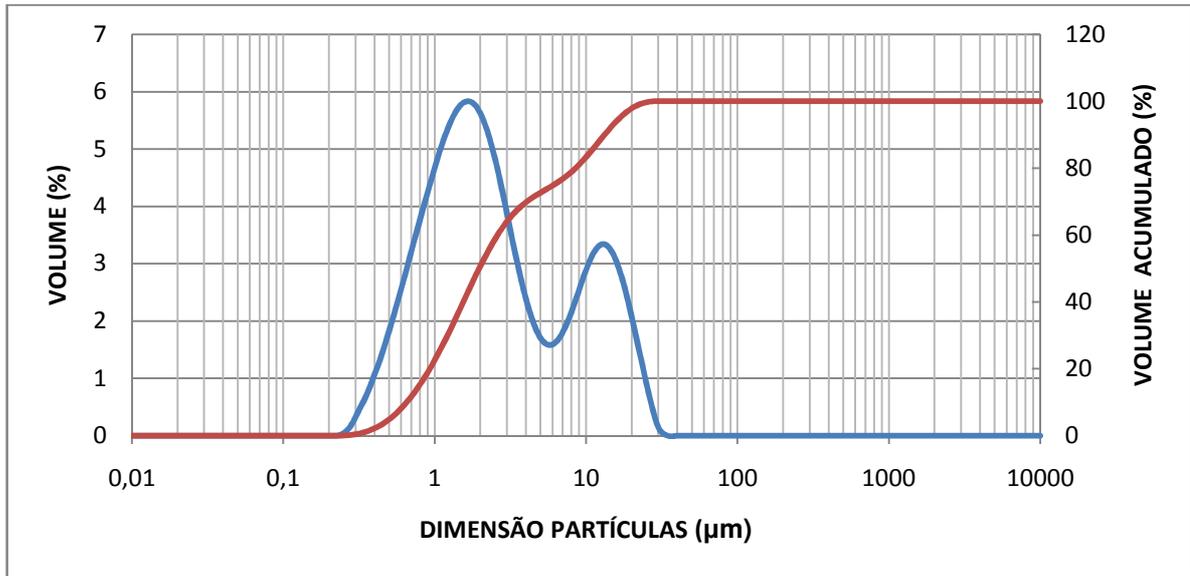


Figura 5.4 – Composição Granulométrica do RGAM12

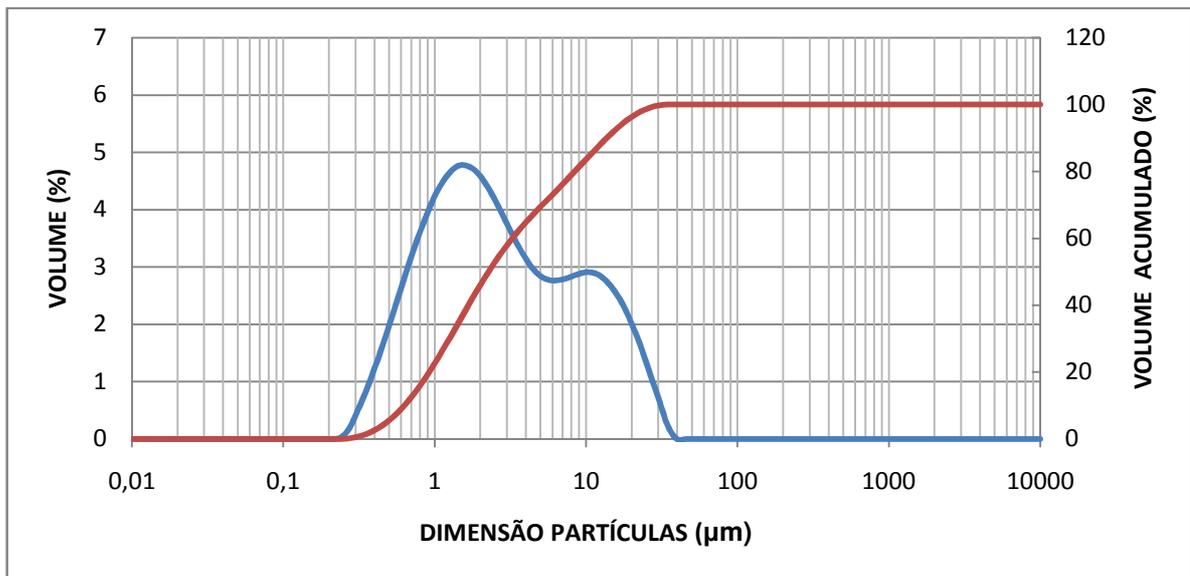


Figura 5.5 – Composição Granulométrica do RGAM24

A distribuição granulométrica das amostras RGAM12 e do RGAM24 é bastante parecida (o que está em concordância com os resultados de massa específica), mas significativamente diferente do resíduo não ativado RGN. Através Tab. 5.3 verifica-se que os três resíduos atendem aos requisitos da norma, o que implica uma classificação potencial de materiais pozzolânicos classe N.

5.3.3. Composição Química e Mineralógica

A análise química do resíduo de granito está apresentada na Tab. 5.4.

Tabela 5.4 – Análise Química do Resíduo de Granito

Análise Química	
Composto Químico	%
SiO ₂	67,14
Al ₂ O ₃	14,92
K ₂ O	5,18
Na ₂ O	2,93
Fe ₂ O ₃	4,40
CaO	1,91
TiO ₂	0,73
MgO	0,73
P.F	0,50
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	86,46

A amostra atendeu aos requisitos estabelecidos em norma quanto às exigências químicas, pois o somatório das porcentagens de Si, Al e Fe estão acima de 70% (Fig. 5.3). Isto sugere uma classificação do resíduo de granito como pozolanas naturais (N).

Tabela 5.5 – Exigências Químicas Materiais Pozolânicos

Exigências Químicas – NBR 12653				
Propriedades	Classe de Material pozolânico			Amostra
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50	86,46
Perda ao fogo, % Max.	10,0	6,0	6,0	0,5

Adaptado da NBR 12653/1992

5.3.4. Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

O índice de atividade pozolânica das três amostras de resíduo de granito foi determinado de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR 5752/1992. Os resultados de resistência à compressão utilizados para o cálculo dos IAP's estão mostrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Resultados Resistência à Compressão Axial (IAP)

<i>Resistência Média à Compressão Axial (MPa)</i>				
Idade Rompimento	Referência	RGN	RGAM12	RGAM24
28 dias	34,62	24,51	23,45	25,26
Desvio Padrão	0,96	1,05	0,42	0,47

Quando se compara os resultados de resistência à compressão das amostras RGN, RGAM12 e RGAM24 verifica-se que eles são praticamente iguais. Mas existe uma diferença quando estes são comparados com a matriz referência.

Segundo a ABNT NBR 12653/1992, material pozolânico é aquele que possui o índice de atividade pozolânica mínimo de 75%. De acordo com a Fig. 5.6 os resultados demonstram que os resíduos de granito não podem ser considerados pozolânicos.

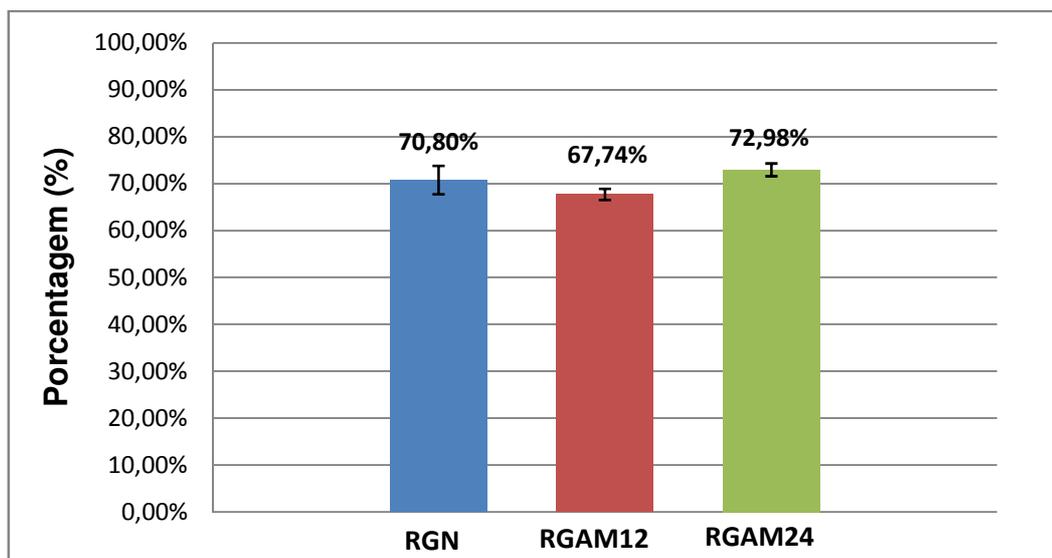


Figura 5.6 – Índice de Atividade Pozolânica

5.4. Caracterização da Matriz Cimentícia

5.4.1. Densidade da Massa no Estado Endurecido

Os resultados com relação densidade de massa no estado endurecido foram obtidos através de ensaio de acordo com prescrições da ABNT NBR 13280/2005.

Os valores das densidades de cada traço estão apresentados na Fig. 5.7.

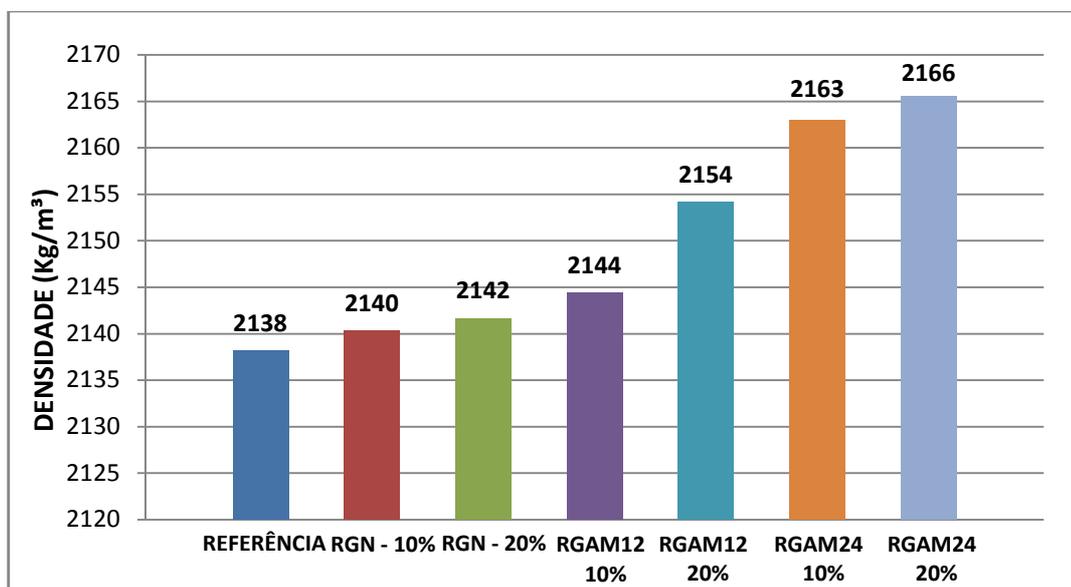


Figura 5.7 – Gráfico Comparativo da Densidade da Massa no Estado Endurecido

De um modo geral, a Fig. 5.7 mostra um crescimento de massa específica no estado endurecido na medida em que os teores de substituição aumentam e também dependente do tipo de materiais que foram usados como substituição (ativado por 12 horas ou 24 horas). Comparando os teores de substituição, RGN e RGAM24 possuem resultados semelhantes tanto para 10% quanto 20% de substituição. Já o RGAM12 é a formulação com maior diferença em massa para teores de 10% e 20% de resíduo de granito.

5.4.2. Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi executado de acordo com a ABNT NBR 7215/1996 e os resultados estão representados na Tab. 5.7.

Tabela 5.7 – Resultados Resistência à Compressão Axial

<i>Resistência Média à Compressão Axial (MPa)</i>							
Idade Rompimento	Referência	RGN 10%	RGN 20%	RGAM12 10%	RGAM12 20%	RGAM24 10%	RGAM24 20%
1 dia	28,61	23,22	19,91	21,51	21,39	23,65	18,87
3 dias	37,51	36,29	29,48	35,00	32,43	31,50	30,04
7 dias	40,28	38,62	30,82	38,43	36,12	36,27	34,97
28 dias	48,32	43,69	36,30	43,72	42,72	41,23	37,56

Ainda foram produzidos gráficos comparativos entre a matriz referência e as matrizes com substituições. Os gráficos que estão apresentados nas figuras 5.8 a 5.10 representam as curvas de tendência durante o período de 1 a 28 dias das matrizes.

De um modo geral, os resultados obtidos mostram que as matrizes com teores de substituição obtiveram resultados de resistência menores quando comparados com a matriz referência.

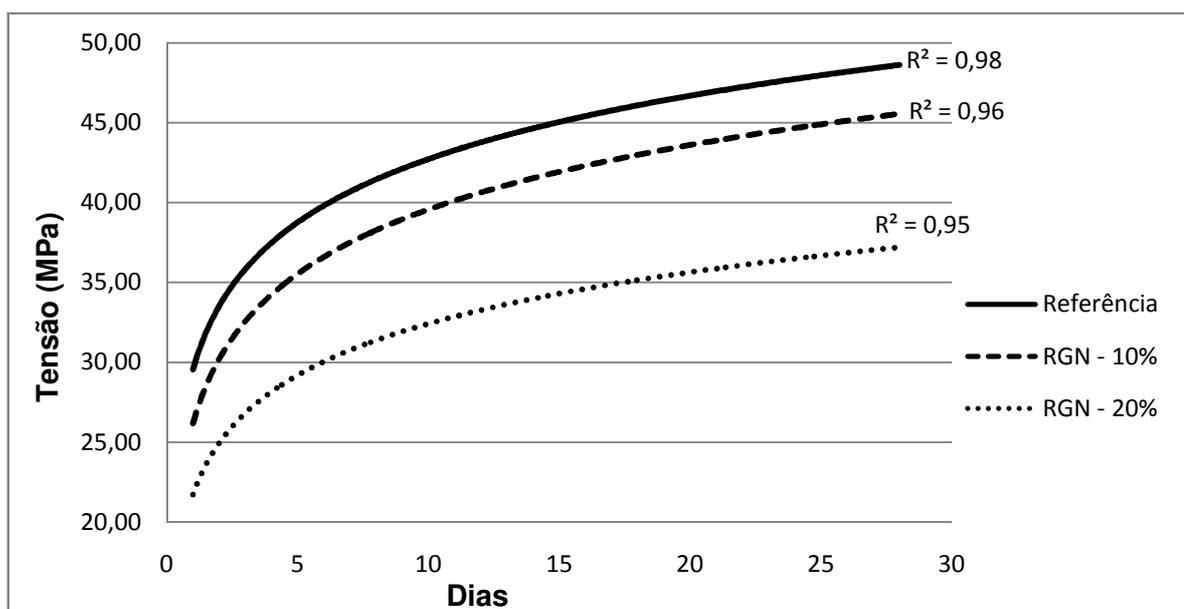


Figura 5.8 – Gráfico Comparativo Referência x RGN (Compressão).

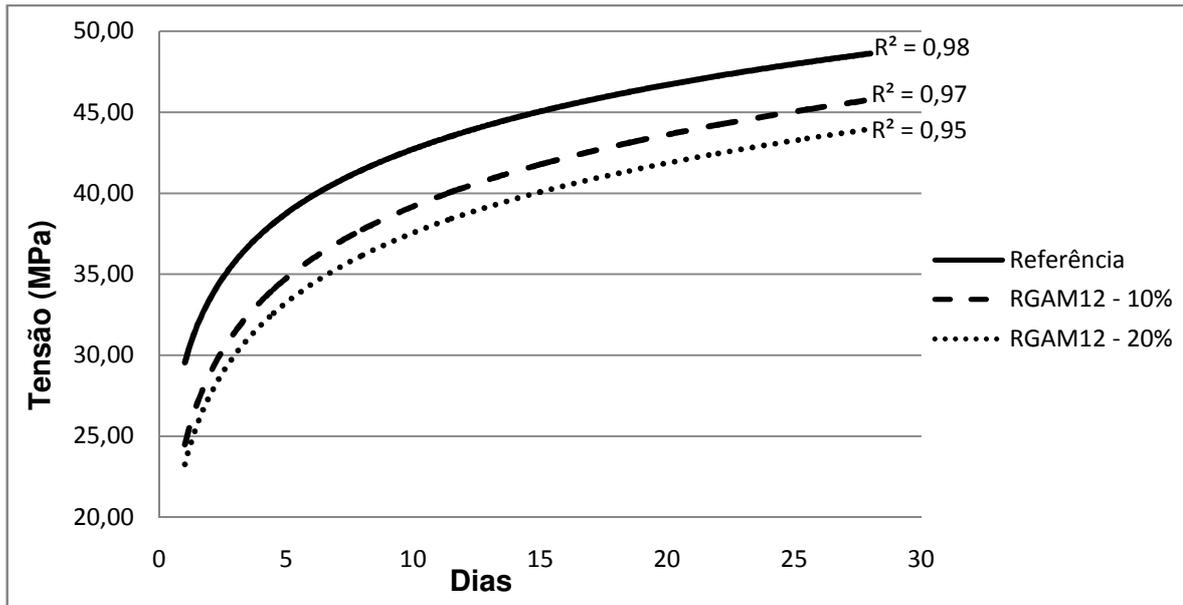


Figura 5.9 – Gráfico Comparativo Referência x RGAM12 (Compressão).

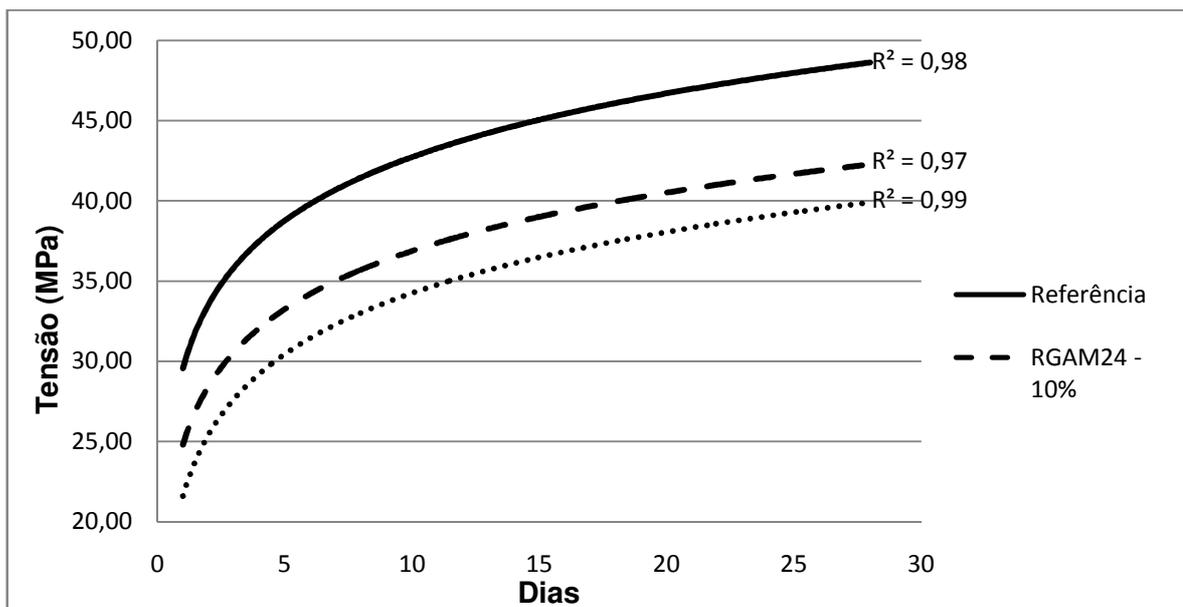


Figura 5.10 – Gráfico Comparativo Referência x RGAM24 (Compressão).

As Fig. 5.8 e 5.10 mostram que, para as formulações contendo resíduo de granito não ativado (RGN) e resíduo ativado por 24 horas (RGAM24), a resistência à compressão diminui para uma maior substituição do cimento, durante todo o período de 28 dias analisado. O mesmo ocorre para as formulações contendo o resíduo ativado por 12 horas (RGAM12) (Fig. 5.9), porém as resistências são mais próximas daquela da formulação de referência.

5.4.3. Resistência à Tração na Flexão

A Tab. 5.8 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão através das especificações da ABNT NBR 13279/2005. As Fig. 5.11 a 5.13 representam as curvas de tendência durante o período de 1 a 28 dias das matrizes.

Tabela 5.8 – Resultados Resistência à Tração na Flexão

Idade Rompimento	Referência	<i>Resistência Média à Compressão Axial (MPa)</i>					
		RGN 10%	RGN 20%	RGAM12 10%	RGAM12 20%	RGAM24 10%	RGAM24 20%
1 dia	5,41	5,92	5,61	5,35	5,11	5,54	5,42
3 dias	5,90	6,18	6,35	5,64	5,99	5,81	6,15
7 dias	6,31	6,55	6,80	6,14	6,40	6,28	6,76
28 dias	7,16	7,35	7,34	6,45	7,39	6,69	7,76

Para as formulações contendo resíduo de granito sem ativação mecânica (RGN), as resistências à tração na flexão foram superiores a resistência de referência durante o período analisado, para os níveis de 10% e 20% de substituição (Fig 5.11). No entanto, para as argamassas confeccionadas com resíduo ativado mecanicamente por 12 ou 24 horas (RGAM12 e RGAM 24), a resistência à tração na flexão só foram superiores a de referência quando o teor de substituição foi de 20%.

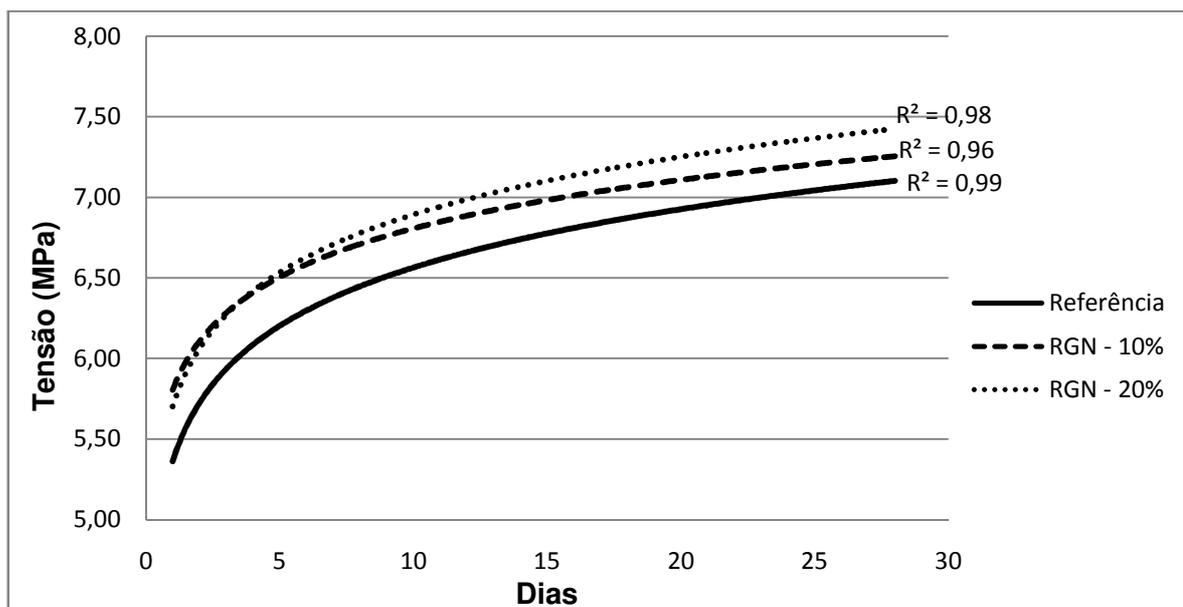


Figura 5.11 – Gráfico Comparativo Referência x RGN (Tração).

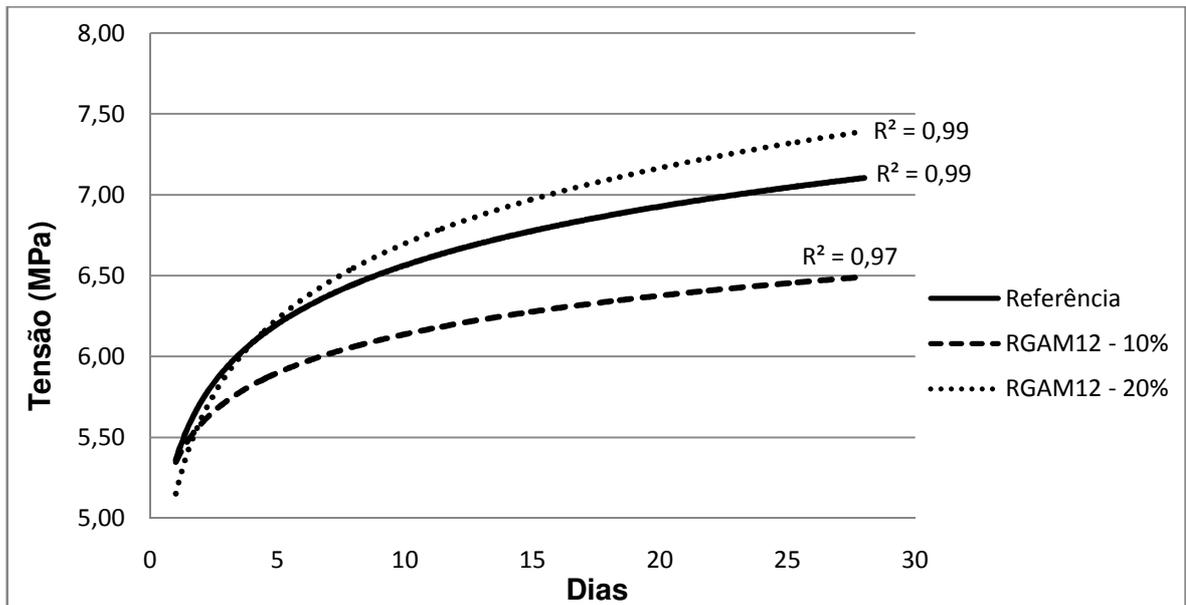


Figura 5.12 – Gráfico Comparativo Referência x RGAM12 (Tração).

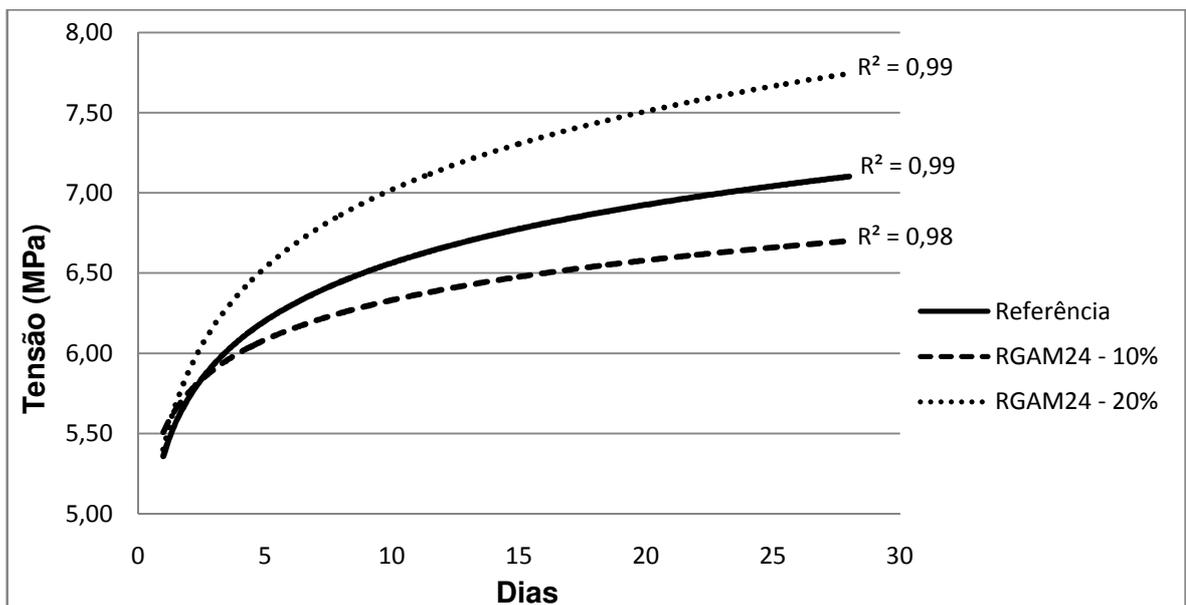


Figura 5.13 – Gráfico Comparativo Referência x RGAM24 (Tração).

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho permitem as seguintes conclusões:

- A substituição do cimento por resíduo de granito não representa solução adequada de acordo com as técnicas e procedimentos estabelecidos nesta pesquisa experimental, embora seja possível perceber algumas melhorias pontuais nas características físicas e mecânicas das dosagens, especificamente nos ensaios de resistência à tração na flexão.
- Os resultados de massa específica demonstram que não houve um diferencial no que tange a tempo ativação mecânica (12 e 24 horas). Portanto, pode-se concluir que as amostras de RGAM12 e RGAM24 são iguais fisicamente.
- A ativação mecânica do resíduo de granito indicou que as moagens de 12 e 24 horas produziram materiais semelhantes em relação a granulometria, com potencial pozolânico de classe N.
- Ainda que a composição química dos resíduos estudados tenha mostrado que os quantitativos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , indicam um potencial pozolânico de classe N.
- As matrizes cimentícias, com substituição de 10% e 20% do cimento por RGN, RGAM12 e RGAM24 não apresentaram potencial pozolânico (70,8%; 67,7%;72,9% < 75%).
- A substituição do cimento por RGN, RGAM12 e RGAM24 produziu resultados de resistência à compressão inferior ao valor de referência, em todos os teores de substituição.
- Porém, a substituição de 20% do cimento Portland por RGN, RGAM12 ou RGAM24 proporciona melhorias na resistência à tração na flexão quando comparada com o valor de referência. O que não pode ser observado para o teor de 10% de substituição do cimento, exceto para RGN.

De um modo geral, a utilização do resíduo de granito requer análises mais específicas.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dada a relevância que a exploração/beneficiamento de granito representa para construção civil e para região sudeste, sugere-se:

- Experimentos para determinação do IAP a partir de métodos termogravimétricos e potencial elétrico.
- Avaliar expansão devido a reação álcali-sílica.
- Produzir matrizes com agregado miúdo, agregado graúdo e lama, totalmente oriundos do processo de corte (blocos e chapas) e polimento (chapas).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Rochas Ornamentais no século XXI. Disponível em: <<http://www.abirochas.com.br/livro.php>>. Acesso em: 7 de setembro de 2010.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211. Agregado para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. Cimento Portland – Determinação da Resistência á compressão. Rio de Janeiro. 1996

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776. Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9939. Agregados – Determinação do teor de umidade total, por secagem. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à compressão – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. NBR NM 23. Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. 2000

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248. Agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

CHIODI FILHO, C. Aspectos Técnicos e Econômicos do Setor de Rochas Ornamentais. Séries Estudos e Documentos, n° 28, 75p. Rio de Janeiro, 1995.

COIMBRA FILHO, C. G. Relação entre Processo de Corte e Qualidade das Superfícies Serradas de Granitos Ornamentais. Dissertação. (Mestrado em Geotecnia) – USP, São Paulo, 2006.

ESTELLIN Jr., Antônio. Serragens de Granito para Fins Ornamentais. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas. São Paulo, 1998.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; MOLIN, D. C. C.. Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. Porto Alegre - RS, jan. /mar. 2002. v.2, n.1, p. 53-68.

KASCHNER, D. Modernização e a Falta de Crédito. Pedras do Brasil, 2004, n° 29.p.92-98.

MATTA, P. M.. Indústria de rochas ornamentais: rejeitos x produção limpa. Salvador Bahia: DNPM, 2003. 45 p. Disponível em:

<http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=2055> Acesso em: 02 setembro 2010.

MCDONOUGH, Willian. Uma nova agenda para a arquitetura. *In*: Nesbitt, Kate (Org). São Paulo: Cosac Naify, 2006. p. 427-440.

MENEZES R. R. et al. Uso de rejeitos granitos como matérias-primas cerâmicas. Paraíba, 2002. p. 92-101. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v48n306/10685.pdf>>. Acesso em: 28 de agosto de 2010.

MONTANI, C. Word Marketing Handbook, Faenza, 2005. Gruppo Editoriale Faenza Editrice, 250 p.

PEITER, C.C. *et al.* Rochas Ornamentais no século XXI: bases de desenvolvimento sustentado das exportações brasileiras. Rio de Janeiro: Cetem/Abirochas. 150p, 2001.

SANTO, H. M. I. E. Procedimentos para uma certificação da construção sustentável. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios. Lisboa, 2010, 129 p . Disponível em:

<http://dspace.fct.unl.pt/bitstream/10362/4045/1/Santo_2010.pdf>. Acesso em: 06 de setembro de 2010.

SOUSA, J. G. Análise Ambiental do Processo de Extração e Beneficiamento de Rochas Ornamentais com Vistas a Uma Produção Mais Limpa: Aplicação em Cachoeiro de Itapemirim – ES. Juiz de Fora, 2007. 42p. Disponível em:

<<http://www.ufjf.br/analiseambiental/files/2009/11/Jos%C3%A9-Gon%C3%A7alves-de-Souza.pdf>>. Acesso em 30 de Agosto de 2010.

SPÍNOLA, V.; GUERREIRO, L. F.; BAZAN, R. A Indústria De Rochas Ornamentais. Estudo de Mercado 02/04, set. 2004. Disponível em:

<http://www.redeaplmineral.org.br/biblioteca/rochas_ornamentais/A%20INDUSTRIA%20DE%20ROCHAS%20ORNAMENTAIS.pdf> Acesso em: 29 de agosto de 2010.

9. ANEXOS

RGN

Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	1.31	11.482	3.99	120.226	0.49	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	1.56	13.183	4.03	138.038	0.14	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	1.79	15.136	4.02	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	2.00	17.378	3.97	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	2.18	19.953	3.86	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	2.35	22.909	3.72	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	2.51	26.303	3.56	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	2.65	30.200	3.37	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	2.80	34.674	3.16	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	2.94	39.811	2.94	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.10	4.365	3.08	45.709	2.70	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.17	5.012	3.23	52.481	2.44	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.28	5.754	3.37	60.256	2.16	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.43	6.607	3.52	69.183	1.84	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.61	7.586	3.67	79.433	1.50	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.83	8.710	3.80	91.201	1.14	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	1.07	10.000	3.91	104.713	0.79	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

RGAM12

Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	5.01	11.482	3.23	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	5.44	13.183	3.34	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	5.73	15.136	3.16	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	5.83	17.378	2.72	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	5.72	19.953	2.09	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	5.37	22.909	1.37	239.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.02	2.512	4.81	26.303	0.67	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.15	2.884	4.10	30.200	0.13	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.44	3.311	3.33	34.674	0.00	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.77	3.802	2.62	39.811	0.00	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	1.19	4.365	2.06	45.709	0.00	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	1.67	5.012	1.70	52.481	0.00	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	2.20	5.754	1.58	60.256	0.00	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	2.76	6.607	1.69	69.183	0.00	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	3.35	7.586	2.00	79.433	0.00	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	3.93	8.710	2.43	91.201	0.00	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	4.49	10.000	2.89	104.713	0.00	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

RGAM24

Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00
0.011	0.00
0.013	0.00
0.015	0.00
0.017	0.00
0.020	0.00
0.023	0.00
0.026	0.00
0.030	0.00
0.035	0.00
0.040	0.00
0.046	0.00
0.052	0.00
0.060	0.00
0.069	0.00
0.079	0.00
0.091	0.00
0.105	0.00

Size (µm)	Volume In %
0.105	0.00
0.120	0.00
0.138	0.00
0.158	0.00
0.182	0.00
0.209	0.00
0.240	0.03
0.275	0.20
0.316	0.55
0.363	0.92
0.417	1.36
0.479	1.83
0.550	2.32
0.631	2.81
0.724	3.29
0.832	3.73
0.955	4.12
1.096	

Size (µm)	Volume In %
1.096	4.43
1.259	4.65
1.445	4.77
1.660	4.76
1.905	4.65
2.188	4.44
2.512	4.16
2.884	3.85
3.311	3.53
3.802	3.24
4.365	3.00
5.012	2.84
5.754	2.77
6.607	2.77
7.586	2.81
8.710	2.87
10.000	2.91
11.482	

Size (µm)	Volume In %
11.482	2.89
13.183	2.79
15.136	2.61
17.378	2.36
19.953	2.02
22.909	1.62
26.303	1.16
30.200	0.70
34.674	0.23
39.811	0.00
45.709	0.00
52.481	0.00
60.256	0.00
69.183	0.00
79.433	0.00
91.201	0.00
104.713	0.00
120.226	

Size (µm)	Volume In %
120.226	0.00
138.038	0.00
158.489	0.00
181.970	0.00
208.930	0.00
239.883	0.00
275.423	0.00
316.228	0.00
363.078	0.00
416.869	0.00
478.630	0.00
549.541	0.00
630.957	0.00
724.436	0.00
831.764	0.00
954.993	0.00
1096.478	0.00
1258.925	

Size (µm)	Volume In %
1258.925	0.00
1445.440	0.00
1659.587	0.00
1905.461	0.00
2187.762	0.00
2511.886	0.00
2884.032	0.00
3311.311	0.00
3801.894	0.00
4365.158	0.00
5011.872	0.00
5754.399	0.00
6606.934	0.00
7585.776	0.00
8709.636	0.00
10000.000	