

**REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE ROCHA ORNAMENTAL NA
PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO**

SIMONE VALÉRIA RIBEIRO

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE- UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES- RJ
SETEMBRO DE 2013**

REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE ROCHA ORNAMENTAL NA PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO

SIMONE VALÉRIA RIBEIRO

“Dissertação de mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências necessárias para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais”.

Orientador: Prof. Dr. José Nilson França de Holanda

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
SETEMBRO DE 2013**

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

83/2013

Ribeiro, Simone Valéria

Reutilização de resíduo de rocha ornamental na produção de tijolo solo-cimento / Simone Valéria Ribeiro. – Campos dos Goytacazes, 2013.

xvi, 80 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2013.

Orientador: José Nilson França de Holanda.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

Bibliografia: f. 74-80.

1. RESÍDUOS SÓLIDOS - REUTILIZAÇÃO 2. ROCHA ORNAMENTAL 3. TIJOLO 4. SOLO-CIMENTO I.

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais

REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE ROCHA ORNAMENTAL NA PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO

Simone Valéria Ribeiro

“Dissertação de mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências necessárias para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais”.

Aprovada em 17 de setembro de 2013.

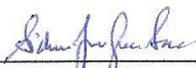
Comissão Examinadora:



Prof. Ângelus Giuseppe Pereira da Silva (D. Sc., Ciências Técnicas) - UENF



Profª. Elaine Cristina Pereira (D. Sc., Engenharia e Ciência de Materiais) - Faculdade Redentor



Prof. Sidnei José Gomes Sousa (D. Sc., Engenharia e Ciência de Materiais) - Faetec



Prof. José Nilson França de Holanda (D. Sc., Engenharia de Materiais) - UENF

Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico especialmente a Deus,
que é meu amparo e consolo. Aos
meus pais, José Geraldo e Maria
Aparecida, por serem a razão do meu
viver. Ao meu irmão Paulo, por me
completar e me ensinar a ser família.
Amo Vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de viver, por minha fé e amor incondicional.

Aos meus pais, por tanto carinho, atenção e cuidado.

Ao Prof. José Nilson França de Holanda, pela orientação, confiança, dedicação e oportunidade de realizar este trabalho.

A Cerâmica Sardinha e a Empresa Marmoreum pelo fornecimento das matérias-primas utilizadas neste trabalho.

Aos professores Ângelus, Elaine e Sidnei por aceitarem fazer parte desta banca.

A todos os professores que passaram por minha formação e compartilharam seus conhecimentos.

A todos da minha família, por terem me dado muitos votos de felicidade.

Aos meus amigos do LAMAV: Mariana Miranda e Ianne, pela confiança, amizade e carinho em todos os momentos que precisei; Fabrício, pela grande ajuda, Thiago, Aline, Flaviane pelo apoio nas etapas deste trabalho, Darlan e os demais colegas da pós-graduação, pela amizade.

Aos secretários e técnicos do LAMAV e LECIV: Rômulo, Elaine, Shirlene, Milton, Vanússia e Michel, que me ajudaram na realização dos ensaios para este trabalho.

A Capes pelo apoio financeiro e a Uenf pela oportunidade e espaço físico.

A todos que me ajudaram direta e indiretamente no desenvolvimento dessa dissertação.

Muito Obrigada.

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	IX
Lista de Tabelas.....	XII
Resumo.....	XIV
Abstract.....	XV
Capítulo 1. Introdução.....	1
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1. Produção de Rochas Ornamentais.....	3
2.2. Geração de resíduo durante o beneficiamento de rochas ornamentais.....	6
2.3. Reutilização do resíduo de rocha ornamental.....	8
2.4. Resíduo sólido.....	10
2.5. Tijolo solo-cimento.....	11
2.6. Vantagens do solo-cimento.....	13
2.7. Matérias primas para a fabricação de tijolos solo-cimento.....	14
2.7.1 Solo.....	14
2.7.2. Água.....	17
2.7.3. Cimento.....	17
2.8. Etapas de fabricação do tijolo solo-cimento.....	21
2.9. Utilização do resíduo de rochas ornamentais para a produção de tijolos modulados de solo-cimento.....	24
Capítulo 3. Materiais e Métodos.....	35
3.1. Matérias-primas.....	36
3.2. Metodologia.....	36

3.2.1. Beneficiamento das Matérias-Primas.....	36
3.2.2. Caracterização das Matérias-Primas.....	36
3.2.2.1. Difração de raios-X.....	37
3.2.2.2. Composição química	37
3.2.2.3. Análises Térmicas (ATD/TG).....	37
3.2.2.4. Análise granulométrica.....	38
3.2.2.5. Plasticidade.....	38
3.2.3. Preparação dos traços com adição de resíduo sólido de rocha ornamental.....	38
3.2.4. Preparação dos corpos-de-prova.....	39
3.2.5. Etapas de cura dos corpos-de-prova.....	40
3.2.6. Caracterização física e mecânica dos corpos-de-prova.....	41
3.2.6.1. Massa específica Bulk.....	41
3.2.6.2. Resistência à compressão.....	41
3.2.6.3. Absorção de água.....	42
3.2.6.4. Durabilidade.....	42
3.2.7. Caracterização microestrutural e de fases dos corpos-de-prova.....	43
Capítulo 4. Resultados e Discussão.....	44
4.1. Caracterização das Matérias-Primas Utilizadas.....	44
4.1.1. Análise mineralógica.....	44
4.1.2. Análise química.....	47
4.1.4. Análise granulométrica.....	48
4.1.5. Plasticidade.....	50

4.1.6. Análise térmica.....	51
4.2. Efeitos do resíduo de rochas ornamentais nas propriedades tecnológicas de solo-cimento.....	53
4.2.1. Adição das propriedades tecnológicas dos corpos cimentícios curados.....	53
4.2.1.1. Retração Linear.....	56
4.2.1.2. Durabilidade dos corpos cimentícios.....	58
4.3. Análise microestrutural e de fases dos corpos cimentícios.....	60
4.3.1. Análise microstrutural.....	60
4.3.2. Análise de fases.....	66
Capítulo 5. Conclusões e Sugestões.....	67
5.1. Conclusões.....	67
5.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	68
Referências Bibliográficas.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição da produção bruta de rochas ornamentais por região no ano de 2007, totalizando 8,0 milhões de toneladas (ABIROCHAS, 2008).....	3
Figura 2.2 – Exportações mensais do setor de rochas ornamentais em 2010 e 2011 (ABIROCHAS, 2012).....	4
Figura 2.3 – Exportações mensais em toneladas do setor de rochas ornamentais em 2011 em comparação com o ano de 2010 (ABIROCHAS, 2012).....	5
Figura 2.4 – Lama abrasiva em (a) e granalha metálica (b) utilizadas no corte de rocha ornamental (Destefani, 2009).....	7
Figura 2.5 – Classificação de resíduos sólidos segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004).....	10
Figura 2.6 – Estrutura do solo (fases sólida, líquida e gasosa) (Grande, 2003)....	15
Figura 2.7 – Divisão dos horizontes no solo (Cabala, 2007).....	16
Figura 2.8 – Clínquer na sua forma original (Santos, 2004).....	18
Figura 2.9 – Composição do cimento Portland com suas possíveis adições (adaptado ABCP, 2002).....	20
Figura 2.10 – Fluxograma do processo de fabricação de tijolos do tipo solo-cimento (Silva, 2013).....	21
Figura 2.11 – Prensas disponíveis no mercado para a produção de tijolos solo-cimento. Prensa automática (a) e manual (b) (Destefani, 2009).....	23
Figura 2.12 – Resistência à compressão simples da mistura MA1. (Faganello, 2006).....	24
Figura 2.13 – Resistência à compressão simples da mistura MA2. (Faganello, 2006).....	24
Figura 2.14 – Teores de absorção de água (a) Traço 1: 7: 2 (b) Traço 1: 6: 3 (c) Traço 1 : 5: 4 e Traço 1: 4,5: 4,5 (MOTA et al., 2010).....	28

Figura 2.15 – Variação de volume dos tijolos ecológicos com resíduo de granito (LIMA et al., 2010).....	31
Figura 2.16 – Perda de massa dos tijolos ecológicos com resíduo de granito (LIMA et al., 2010).....	31
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas envolvidas neste trabalho.....	32
Figura 3.2 – Prensa hidráulica utilizada na confecção dos corpos cimentícios.....	40
Figura 3.3 – Câmara úmida utilizada durante a cura dos corpos-de-prova.....	40
Figura 3.4 – Máquina utilizada no ensaio de compressão simples.....	41
Figura 4.1 – Difratoograma de raios-X do resíduo de rocha ornamental: Q - Quartzo; M – Muscovita; F – Feldspato sódico;G – Goetita; C – Calcita; MI – Microclina e H – Hematita.....	44
Figura 4.2 – Difratoograma de raios-X do solo arenoso: Ca - Caulinita; G - Goetita; F – Feldspato sódico; Q – Quartzo; Mu – Muscovita e M – Microlina.....	45
Figura 4.3 – Difratoograma de raios-X do cimento Portland CPIII-40RS: 1 = Ferroaluminato tetracálcico (C ₄ AF); 2 = Alita (C ₂ S); 3 = Carbonato de cálcio; 4 = Belita (C ₂ S); 5 = Aluminato tricálcio (C ₃ A); 6 = Óxido de cálcio; 7 = Gipsita (CaSO ₄).....	46
Figura 4.4 – Distribuição de tamanho de partícula do resíduo de rocha ornamental.....	49
Figura 4.5 – Distribuição de tamanho de partícula do solo arenoso.....	49
Figura 4.6 – Curva de ATD/TG do solo arenoso.....	52
Figura 4.7 – Curva de ATD/TG do resíduo de rocha ornamental.....	53
Figura 4.8 – Massa específica bulk dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de rocha ornamental após 28 dias de cura.....	54
Figura 4.9 – Resistência à compressão dos corpos cimentícios com 28 dias de cura.....	55

Figura 4.10 – Absorção de água dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de rocha ornamental após 28 dias de cura.....	56
Figura 4.11 – Retração linear dos corpos cimentícios.....	56
Figura 4.12 – Retração volumétrica dos corpos cimentícios.....	57
Figura 4.13 – Corpos-de-prova incorporados com 0, 10, 20, 30 e 40 % de resíduo, respectivamente.....	57
Figura 4.14 – Corpos cimentícios após ensaio de durabilidade.....	58
Figura 4.15 – Resistência à Compressão dos corpos cimentícios após ensaio de durabilidade.....	59
Figura 4.16 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0 % de resíduo de rocha ornamental: a) 108X; b) 216X; c) 430X.....	60
Figura 4.17 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 10 % de resíduo de rocha ornamental: a) 108X; b) 216X; c) 430X.....	61
Figura 4.18 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 20 % de resíduo de rocha ornamental: a) 108X; b) 216X; c) 430X.....	62
Figura 4.19 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 30 % de resíduo de rocha ornamental: a) 108X; b) 216X; c) 430X.....	63
Figura 4.20 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 40 % de resíduo de rocha ornamental: a) 108X; b) 216X; c) 430X.....	64
Figura 4.21 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0, 10, 20, 30 e 40 % de resíduo de rocha ornamental em 430X.....	65
Figura 4.22 – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 % , 10% , 20% , 30% e 40 % de resíduo de rocha ornamental: M = Muscovita; Mi = Mica; E – Etringita; C = Calcita; Ca = Caulinita; G = Gibsita; I = Ilita; Q = Quartzo; Si = Silicato de cálcio; H = Hematita; Cr = Cristobalita e P = Pirita.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Evolução da produção brasileira de rochas voltada para os mercados internos e externos – 2000-2011 (adaptado de ABIROCHAS, 2012)....	5
Tabela 2.2 – Estimativa da produção de resíduo de acordo com vários autores, durante o processo de serragem de rochas (Destefani, 2009).....	08
Tabela 2.3 – Tipos de tijolos de solo-cimento (Lima, 2010).....	12
Tabela 2.4 – Divisões do solo de acordo com algumas escalas. (Cabala, 2007).....	15
Tabela 2.5 – Classificação do Cimento Portland (ABCP, 2002).....	20
Tabela 2.6 – Características do solo para a fabricação de tijolos de solo-cimento segundo a ABCP (1985).....	22
Tabela 2.7 – Valores de resistência à compressão e absorção de água para tijolo de solo-cimento (ABNT, 1994).....	23
Tabela 2.8 – Absorção de água e Resistência à compressão simples dos tijolos solo cimento com 10 % de cimento (Miranda, 2007).....	26
Tabela 2.9 – Absorção de água e Resistência à compressão simples dos tijolos solo cimento com 15 % de cimento (Miranda, 2007).....	27
Tabela 2.10 – Análise química do resíduo de granito (Mota et al., 2010).....	28
Tabela 2.11 – Composição química (% em massa) do resíduo de granito (LIMA et al., 2010).....	29
Tabela 2.12 – Valores obtidos de absorção de água (%) (LIMA et al., 2010).....	30
Tabela 2.13 – Resultados de Resistência a Compressão simples (MPa) (LIMA et al., 2010).....	30
Tabela 2.14 – Absorção de água com tijolos incorporados com resíduo de granito para idade de cura de 7 e 28 dias (Lima, 2010).....	32
Tabela 2.15 – Resistência à compressão simples dos tijolos solo cimento com resíduo de granito (Lima, 2010).....	33

Tabela 3.1 – Composição dos traços para as misturas de solo-cimento para os corpos (em g).....	39
Tabela 3.2 – Composição dos traços para as misturas de solo-cimento para os corpos de prova unitário (em partes).....	39
Tabela 4.1 – Composição química da escória de alto forno do cimento Portland CPIII-40RS (Pinto, 2010).....	46
Tabela 4.2 – Composição química do resíduo de rocha ornamental, solo arenoso e Cimento Portland CPIII-40RS (% em peso).....	48
Tabela 4.3 – Limites de consistência de Atterberg do solo arenoso (%).....	50
Tabela 4.4 – Limites de consistência de Atterberg das massas cimentícias (%)...	51
Tabela 4.5 – Perda de massa final dos corpos cimentícios após o sexto ciclo do ensaio de durabilidade.....	58

Resumo da dissertação apresentada ao CCT-UENF como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE ROCHA ORNAMENTAL NA PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO

Simone Valéria Ribeiro

17 de setembro de 2013

Orientador: Prof. José Nilson França de Holanda

As atividades do setor de rochas ornamentais geram enormes quantidades de resíduos sólidos, que podem causar consequências negativas ao meio ambiente. No Brasil, este resíduo tem sido, na maioria das vezes, disposto no meio ambiente de forma inadequada, causando impacto ambiental. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar a possibilidade de incorporação de resíduo sólido proveniente da indústria de rochas ornamentais na fabricação de corpos cimentícios para uso em tijolo do tipo solo-cimento. Foram utilizadas as seguintes matérias-primas: solo arenoso, cimento Portland e resíduo sólido de rocha ornamental proveniente da região de Campos dos Goytacazes-RJ. As matérias-primas foram caracterizadas quanto a difração de raios-X, composição química, análise térmica, análise granulométrica, análise morfológica e plasticidade. Foram preparados corpos de prova cilíndricos com incorporações de 0, 10, 20, 30 e 40 % em peso de resíduo em substituição ao solo arenoso. Os corpos cimentícios foram confeccionados por prensagem uniaxial a 18 MPa, com teor de umidade de 16 % e curados por 28 dias. Os corpos cimentícios curados foram caracterizados em termos de absorção de água, massa específica bulk, durabilidade e resistência à tração por ensaio de compressão simples. Os resultados experimentais indicaram que, nas condições estudadas, o solo arenoso pode ser incorporado com até 40 % em peso de resíduo de rocha ornamental em tijolo solo-cimento.

Abstract of dissertation presented to CCT-UENF as part of the requirements for obtaining the Master Degree in Materials Engineering and Science.

REUSE OF ORNAMENTAL ROCK WASTE IN THE PRODUCTION OF SOIL-CEMENT BRICK

Simone Valéria Ribeiro

September 17th, 2013

Advisor: Prof. José Nilson França de Holanda

The activities of the stone industry generate huge amounts of solid waste, which can cause adverse effects to the environment. In Brazil, this residue has been mostly improperly disposed in the environment causing environmental impact. In this context, this study aims to evaluate the possibility of incorporating ornamental rock solid waste in the manufacture of cementitious bodies for use in soil-cement brick. The following raw materials were used: sandy soil, Portland cement, and solid waste ornamental rock waste from the region of Campos dos Goytacazes-RJ. The raw materials were characterized in terms of X-ray diffraction, chemical composition, thermal analysis, particle size analysis, morphological analysis and plasticity. Cylindrical specimens were prepared with additions of 0, 10, 20, 30 and 40 wt. % worth in replacement of sandy soil. The cementitious bodies were prepared by uniaxial pressing at 18 MPa, with a moisture content of 16 wt. % and cured for 28 days. The cured specimens were characterized in terms of water absorption, bulk density, durability, and simple compression strength. The experimental results shows that, for the studied conditions, the sandy soil could be replaced with up to 40 wt. % of ornamental rock waste in the product from of soil-cement brick.

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO

Na atualidade, o processo de reutilização de resíduos sólidos industriais poluentes por incorporação em materiais cerâmicos para a construção civil tem ganhado grande destaque no Brasil e no mundo, sobretudo no campo acadêmico. Este processo consiste, por exemplo, em incorporar o resíduo numa matriz cerâmica usada na fabricação de materiais cerâmicos para construção civil tais como tijolos maciços, blocos cerâmicos, telhas, revestimentos de piso e parede, argamassas e tijolos solo-cimento (Perez et al., 1996; Dondi et al., 1997; Souza e Holanda, 2005).

A incorporação de resíduos poluentes em materiais para construção civil é atrativa devido aos seguintes fatores:

- 1) A indústria da construção civil consome enorme volume de matérias-primas naturais;
- 2) Possibilita menor consumo de matérias-primas naturais;
- 3) O processo produtivo geralmente não sofre grandes modificações com a introdução do resíduo na massa cerâmica;
- 4) Produtos cerâmicos para construção civil permitem larga variabilidade de sua composição química e mineralógica; e
- 5) Possibilidade de inertizar resíduos poluentes na estrutura do material cerâmico.

O Brasil é responsável por uma forte atividade industrial de extração e beneficiamento de rochas ornamentais, tais como granito, mármore, gnaisse, ardósia, entre outras. Esta atividade tem dado grande contribuição à economia nacional, gerando riquezas e desenvolvimento social. Ressalta-se que o Brasil é o centro produtor de rochas ornamentais mais rico em granitos (Chiodi, 2005). De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2013b), no ano de 2011, o Brasil se situou como o quarto maior produtor e sétimo maior exportador mundial de rochas ornamentais, em volume físico e como 3º maior exportador de blocos de granito e de produtos de ardósia.

Esta atividade de extração e beneficiamento de rochas gera enormes quantidades de resíduos sólidos, que podem causar consequências negativas à segurança do meio ambiente e à saúde das pessoas. Estes resíduos não têm uma aplicação prática definida. Por este motivo, eles são em grande parte descartados em rios, lagoas, lagos, córregos e no meio ambiente, resultando em impactos

negativos para o meio ambiente (Almeida et al., 2007). Diversos trabalhos têm sido realizados particularmente no campo da cerâmica na busca de uma solução correta e definitiva para a disposição final de resíduos sólidos de beneficiamento de rochas ornamentais (Menezes et al. 2005). Em geral esses trabalhos são voltados para incorporação em massas de cerâmica vermelha (tijolos, blocos cerâmicos e telhas) e pisos cerâmicos vitrificados. Por outro lado, verifica-se na literatura, que existem poucos trabalhos sobre o uso deste abundante resíduo na fabricação de tijolos solo-cimento.

O presente trabalho de Dissertação de Mestrado teve como objetivo principal o estudo da influência da adição do resíduo de rochas ornamentais proveniente da região de Campos dos Goytacazes-RJ nas propriedades tecnológicas e microestrutura de corpos cimentício para produção de tijolo solo-cimento. Em particular, o resíduo sólido de rochas ornamentais foi utilizado em substituição parcial do solo arenoso, que é uma matéria-prima natural.

No capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura com ênfase sobre o setor de rochas ornamentais, geração de resíduo de rochas ornamentais, tijolos solo-cimento e incorporação de resíduo de rocha ornamental em materiais cerâmicos. No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos empregados no desenvolvimento da presente dissertação de mestrado. No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados experimentais. E, finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões da presente dissertação de mestrado, bem como as perspectivas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Produção de Rochas Ornamentais

As rochas utilizadas para ornamentação de ambientes e revestimentos em geral são denominadas de rochas ornamentais. Estas rochas são classificadas em termos de sua composição como: i) rochas silicáticas que são os granitos; ii) rochas carbonáticas formadas por mármore e calcários; iii) rochas silicosas que são os quartzitos; iv) rochas síltico-argilosas que são as ardósias; e v) rochas ultramáficas formadas por serpentinitos, pedra sabão e pedra talco (ABIROCHAS, 2004). No Brasil são produzidas 500 variedades dessas rochas sendo 60 % de granitos, 20 % de mármore e travertinos e cerca de 8 % de ardósia. Existem cerca de 10.000 empresas no setor de rochas ornamentais, que geram cerca de 105 mil empregos diretos (ABIROCHAS, 2004). Estima-se que tenham sido gerados pelo menos 50.000 empregos diretos no ano de 2012, observando que as exportações brasileiras neste ano foram US\$ 900 milhões superiores às de 1999 (ABIROCHAS, 2013).

Em 2011 o Brasil foi classificado como o 4º maior produtor e 7º exportador mundial de rochas ornamentais, em volume físico; foi classificado também como 3º maior exportador de blocos de granito e de produtos de ardósia (ABIROCHAS, 2013b).

A produção de rochas ornamentais e de revestimento encerrou o ano de 2011 com uma produção de nove milhões de toneladas, e com uma variação de 1,1 % em relação ao ano de 2010. Dessa produção, aproximadamente 2,2 milhões de toneladas foram exportadas, obtendo um faturamento de US\$ 1 bilhão e comprovando que o impacto da crise econômica dos países da União Européia não teve grande influência nas exportações de rochas do Brasil (ABIROCHAS, 2012).

O consumo interno também aumentou em 3 %, principalmente em São Paulo, e mais de 60 % do investimento continuou em exportações de chapas polidas de granito para os EUA e em exportações de blocos de granito para a China, afirma (ABIROCHAS, 2012).

A região Sudeste foi classificada como a maior produtora de rochas, totalizando mais de 60 % em 2011, enquanto a região Nordeste produziu cerca de 25 % e as demais regiões 11 %.

A produção de rochas ornamentais no Brasil está em constante crescimento. Em 13 anos, de 2000 até 2012, esta produção cresceu cerca de 4,3 milhões de toneladas como demonstrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Evolução da produção brasileira de rochas voltada para os mercados internos e externos – 2000-2012 (adaptado de ABIROCHAS, 2012; ABIROCHAS, 2013).

<i>Período</i>	<i>Produção (%) Mercado Externo</i>	<i>Produção (%) Mercado Interno</i>	<i>Produção total (toneladas)</i>
2000	24,6	75,4	5.228.600,0
2001	25,6	74,4	5.153.366,4
2002	28,0	72,0	5.559.955,0
2003	32,0	68,0	6.086.061,3
2004	36,0	64,0	6.457.731,7
2005	39,5	60,5	6.894.274,4
2006	43,4	56,6	7.521.759,3
2007	42,3	56,6	7.971.806,7
2008	34,6	65,4	7.800.000
2009	29,5	70,5	7.600.000
2010	33,7	66,3	8.900.000
2011	32,2	67,8	9.000.000
2012	24,1	75,9	9.300.000

No ano de 2012 a produção brasileira de rochas ornamentais foi estimada em 9,3 milhões de toneladas, com exportações que atingiram US\$ 1,06 bilhão e 2,24 milhões de toneladas. A participação do faturamento das exportações brasileiras de rochas, no total das exportações brasileiras, foi de 0,44 % em 2012. Para cada US\$ 1,00 importado pelo Brasil, exportou-se apenas US\$ 1,09, enquanto no setor de rochas, para cada US\$ 1,00 importado, exportou-se US\$ 17,41 (ABIROCHAS, 2013).

A Figura 2.1 apresenta o montante das exportações de rochas ornamentais Brasileira nos anos de 2011, 2012 e no primeiro semestre de 2013. Percebe-se que no mês de agosto dos anos de 2011 e 2012, o país alcançou seu maior faturamento em exportação. Em 2013, esses valores alcançados em agosto de 2011 e 2012 foram superados no segundo trimestre do ano nos meses de abril, maio e junho.

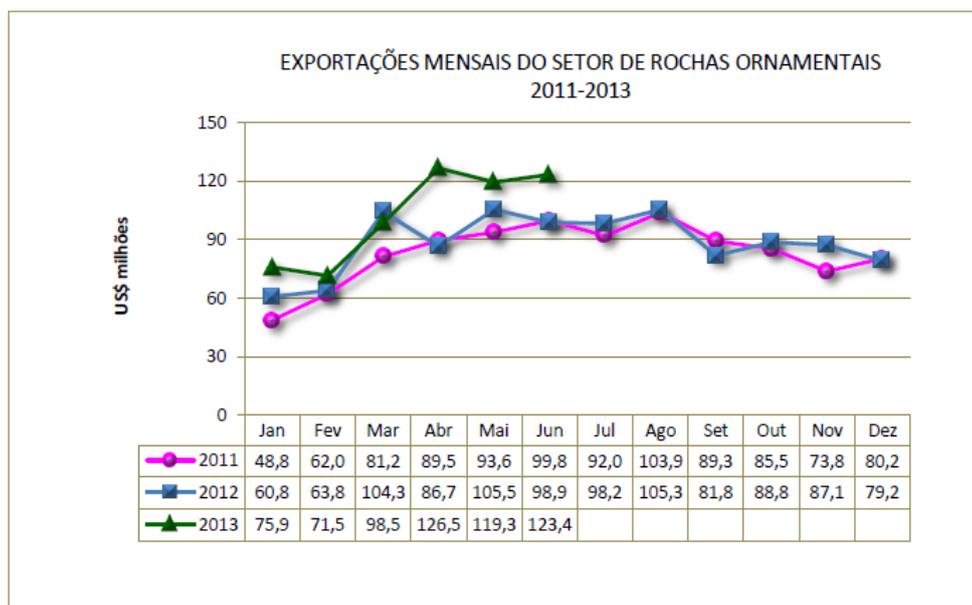


Figura 2.1 – Exportações mensais do setor de rochas ornamentais em 2011, 2012 e 2013 (ABIROCHAS, 2013).

Segundo ABIROCHAS (2013), no 1º semestre de 2013, as exportações já totalizaram US\$ 615,19 milhões, correspondentes à comercialização de 1.252.553,82 t. Estes dados representam uma variação positiva de 18,29 % no faturamento e 15,26 % no volume físico exportado, frente ao mesmo período de 2012, como mostra a Figura 2.2.

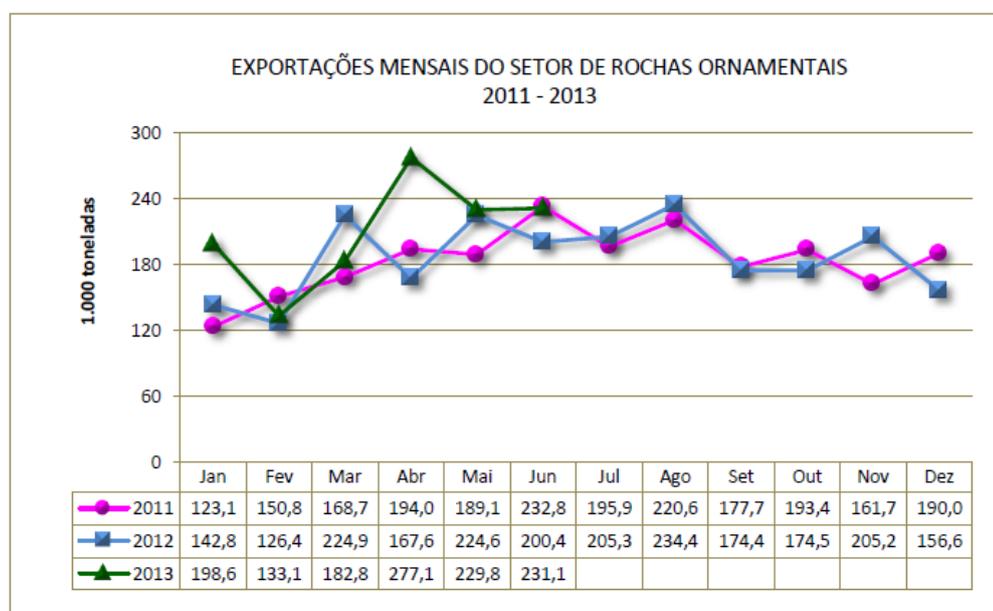


Figura 2.2 - Exportações mensais em toneladas do setor de rochas ornamentais em 2012 e 2013 em comparação com o ano de 2011 (ABIROCHAS, 2013).

Em agosto de 2013, especificamente, a produção brasileira de rochas ornamentais atingiu um recorde mensal histórico de exportações, com US\$ 135,3 milhões e 300,2 mil toneladas. Esses valores superam o limite logístico da capacidade exportadora brasileira até agora admitido (em torno de 250-270 mil t/mês). Dentre os produtos exportados, as rochas processadas continuam com valores elevados de 78 % na participação do faturamento das exportações de rochas ornamentais (ABIROCHAS, 2013).

Com os elevados índices de produção de rochas ornamentais no Brasil e no mundo, vem aumentando também os resíduos gerados no processo desta fabricação, já que o desperdício pode chegar a 50 % em massa do total de rochas produzidas (Menezes et al, 2002). A grande maioria dos resíduos gerados atualmente está sendo despejada em rios, lagos e diretamente nos solos, contaminando o meio ambiente e causando também riscos à saúde da população, que entram em contato direto e indireto com estes materiais.

2.2 – Geração de resíduo durante o beneficiamento de rochas ornamentais.

A extração e o beneficiamento de rochas são as principais funções do setor de mineração e beneficiamento de rochas ornamentais no Brasil (Manhães e Holanda, 2008). A extração consiste na retirada de pedras brutas das pedreiras e o beneficiamento é o processo de transformação dessas pedras em chapas polidas próprias para o consumo. Este último processo se divide em dois: beneficiamento primário e final. O primário consiste no desdobramento em blocos dessas pedras brutas. Estes blocos sofrem um processo de serragem por meio de teares, chapas ou talha-blocos até atingirem dimensões entre 5 m³ e 10 m³ (Setec, 2007). As chapas produzidas sofrem polimento e são resinadas no processo conhecido como beneficiamento final. Após esses processos a rocha está pronta para ser aplicada nas mais diversas modalidades de ornamentação e revestimento.

A produção de resíduos durante o beneficiamento de rochas ornamentais é gerada em enormes quantidades em forma de lama constituída por pó de pedra, cal, água e granalha metálica e pó de pedra com retalhos de rochas (Destefani, 2009). A lama abrasiva (Figura 2.3a) é formada pela união de água usada para refrigerar as máquinas de beneficiamento de rochas e abrasivos como a granalha metálica (Figura 2.3b) que, ao ser adicionada em maior quantidade, acelera o processo de

serragem dos blocos de rochas. O pó é produzido durante o processo de corte e polimento.

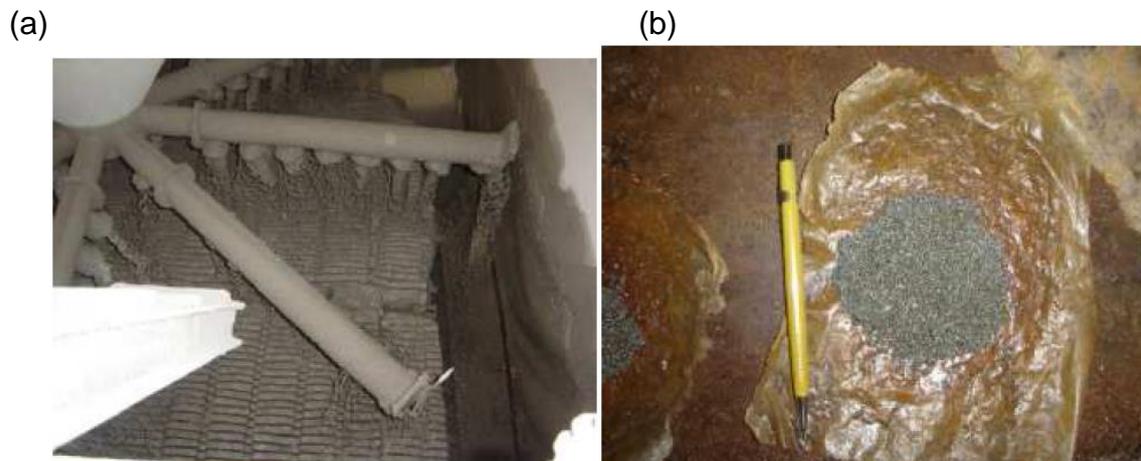


Figura 2.3 – Lama abrasiva em (a) e granalha metálica (b) utilizadas no corte de rocha ornamental (Destefani, 2009).

A lama é lançada muitas vezes a céu aberto em áreas de aterros, e após sofrer evaporação transforma-se em pó. Em alguns casos são lançadas diretamente em rios sem passar antes por nenhum tratamento contaminando as águas de nascentes e córregos, além de poluir o ar e o solo.

No Brasil, no ano de 2007, a produção de rochas ornamentais atingiu 8 milhões de toneladas, que segundo (Destefani, 2009) gerou próximo de 682 mil m³ de resíduos de rochas em volume, equivalente a 1,8 milhões de toneladas de resíduos.

Segundo as pesquisas de vários autores, o processo de serragem de blocos de rochas ornamentais produz uma grande quantidade de resíduos, apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Estimativa da produção de resíduo de acordo com vários autores, durante o processo de serragem de rochas (Destefani, 2009).

<i>Autores</i>	<i>Estimativa de resíduos gerados (% em volume em relação ao bloco)</i>
Freire e Mota (1995) e Souza (2001)	20 % a 25 %
Gonçalves (2000) e Cavalcanti (2006)	25 % a 30 %
Silva (1998) e Vieira (2004)	30 %
Gobbo et. al. (2004) e Mello et. al. (2006)	30 % a 40 %
Almeida, Branco e Santos (2007); Acchar e Dantas (2007)	40 %
Almeida e Pontes (2001)	40 % a 50 %
Vilaschi e Sabadini (2000)	25 % a 30 %
INET (2001)	25 %

Os resíduos gerados principalmente na produção de granitos são abandonados, muitas vezes, em aterros ou lagoas de decantação (Filho et al., 2005).

2.3 – Reutilização e caracterização do resíduo de rocha ornamental

Com a rigidez das leis que protegem o meio ambiente, as empresas produtoras de rochas ornamentais, se vêem obrigadas a dar um destino mais apropriado para os resíduos formados durante o processo de beneficiamento das rochas.

Muitos pesquisadores começaram a desenvolver alguns métodos para a reutilização dos resíduos derivados da indústria de extração e beneficiamento de rochas ornamentais, na produção de diversos produtos, sem que estes percam suas características, e de forma que durante a fabricação não produza maiores gastos de energia. Outros pretendem diminuir parte do consumo de matéria-prima natural e não renovável, incorporando resíduos de rochas ornamentais em sua composição.

Em relação à reciclagem de resíduos industriais, a indústria cerâmica tem ganhado destaque, por possuir um alto volume de produção, dando assim uma destinação mais apropriada para uma grande quantidade de resíduos (Collatto E

Bergmann, 2009). Esses resíduos são incorporados especialmente na produção dos produtos cerâmicos como tijolos, blocos e pisos, substituindo parte da matéria prima tirada diretamente da natureza e utilizada no processo de confecção desses materiais, por resíduos que contém propriedades químicas e mineralógicas, que, adicionados em quantidades apropriadas, beneficiam a produção desses produtos cerâmicos (Manhães e Holanda, 2008).

Encontram-se pesquisas que concluíram que os resíduos de rocha ornamental podem ser utilizados na produção de argamassa para a construção civil; o resíduo do beneficiamento do granito pode ser incorporado na confecção de blocos e revestimentos cerâmicos; o resíduo da serragem é aplicado em concreto asfáltico como fíler, preenchendo os espaços vazios do asfalto ou em substituição total ou parcial dos agregados minerais presentes na composição do asfalto; na fabricação de cimento Portland e na produção de tijolos solo-cimento (Destefani, 2009).

O resíduo de rocha ornamental apresenta algumas características físicas como: fina granulometria, composição pré-definida (constituída de granito moído, cal ou substituto e granalha de ferro ou aço) e não apresenta grãos mistos entre os três componentes básico, afirma (Miranda, 2007) apud (Souza et. al., 2005), que o faz útil como material de enchimento.

Lima et. at. (2010) caracterizaram fisicamente o resíduo de granito e obteve os seguintes resultados para a composição granulométrica: 16,93 % equivalente a fração argila ($< 2 \mu\text{m}$); 81,61 % equivalente a fração silte ($2 \mu\text{m} < X < 60 \mu\text{m}$) e 18,39 % equivalente a fração areia ($60 \mu\text{m} < X < 2000 \mu\text{m}$), e calcularam o diâmetro médio de suas partículas, encontrando o resultado de $13,87 \mu\text{m}$, comprovando a baixa granulometria do resíduo.

Lopes (2007) calculou o diâmetro das partículas do resíduo de beneficiamento de mármore e granitos e verificou que a faixa de variação do diâmetro foi de 7 a $19 \mu\text{m}$, concluindo que o resíduo pode ser considerado um fíler. Os fíleres que, apresentam diâmetro médio abaixo de $50 \mu\text{m}$, podem contribuir no preenchimento de vazios deixados pelos produtos de hidratação do cimento, afirma Gonçalves (2000).

Lopes (2007) determinou o índice de atividade pozolânica do resíduo de beneficiamento de mármore e granitos ao ser adicionado ao cimento, e encontrou o resultado de 54,80 %, valor inferior à norma NBR 12653 (ABNT, 1992), que afirma

que um material apresenta atividade pozolânica quando seu índice de atividade pozolânica for superior a 75 %. O resíduo também foi adicionado à cal e verificado seu índice de atividade pozolânica, resultando em 1 MPa de resistência à compressão simples, valor inferior a 6 MPa, como recomendado pela norma 12653 (ABNT, 1992), concluindo que o resíduo do beneficiamento de mármore e granito não apresenta atividade pozolânica.

Lopes (2007) utilizou também o método de Fratini para analisar a atividade pozolânica do resíduo. Os procedimentos feitos neste método são descritos pela norma NBR 5753 (ABNT, 1991). O resultado deste ensaio é uma curva de saturação do hidróxido (Figura 2.4), em função da alcalinidade, que avalia se os materiais estudados comportam-se como cimento pozolânico. Se o resultado apresentado estiver acima da curva, então o material em estudo é não pozolânico, se estiver abaixo ocorrerá o oposto. Percebe-se que o resíduo se encontra acima da curva, concluindo novamente que o resíduo não apresenta atividade pozolânica.

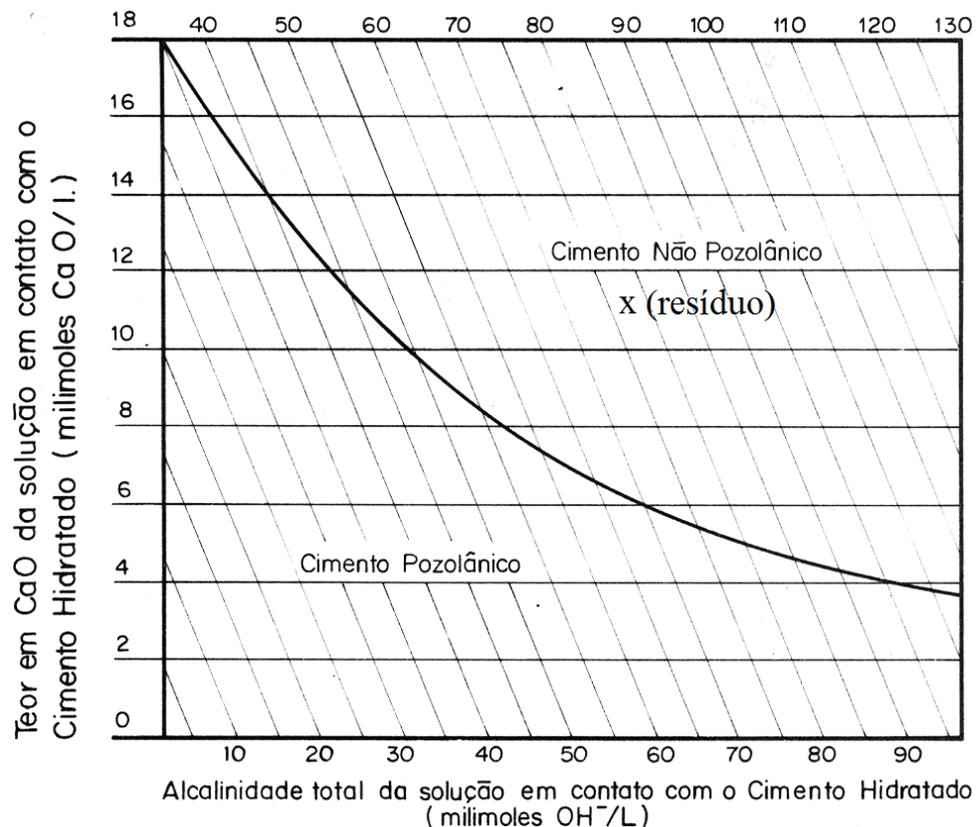


Figura 2. 4 - Gráfico da Curva de Saturação do Hidróxido de Cálcio- CaO (OH)_2 (Lopes, 2007).

A Tabela 2.3 apresenta a composição química do resíduo de rocha ornamental (RRO), do resíduo do corte de granito (RCG), do resíduo do beneficiamento de mármore de granitos (RBMG) e do resíduo de granito (RG), encontrados na literatura. Verifica-se que todos os resíduos são constituídos predominantemente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) e apresentam Fe_2O_3 proveniente da granalha metálica utilizada durante o corte da rocha.

Tabela 2.3 - Composição química dos resíduos (%).

<i>Composição</i>	<i>RRO</i>	<i>RCG</i>	<i>RBMG</i>	<i>RG</i>
<i>Região do resíduo</i>	<i>RJ</i>	<i>RS</i>	<i>GO</i>	<i>PB</i>
<i>Autor</i>	<i>(Moreira et. al. 2005)</i>	<i>(Gonçalves, 2000)</i>	<i>(Lopes, 2007)</i>	<i>(Lima et. al., 2010)</i>
CaO	2,33	4,83	6,13	6,14
SiO ₂	72,17	59,62	58,67	59,56
Fe ₂ O ₃	5,04	9,49	7,59	6,58
Al ₂ O ₃	10,80	12,77	11,26	16,46
K ₂ O	3,87	5,30	2,90	4,16
SO ₃	-	0,03	-	-
TiO ₂	1,07	-	-	-
MgO	0,94	1,96	2,96	2,82
CaSO ₄	-	-	0,07	-
P ₂ O ₅	0,27	-	-	-
MnO	0,08	-	-	-
Na ₂ O	2,34	2,72	2,74	2,32
Perda ao fogo	1,08	1,92	-	-

2.4 – Resíduo sólido

A Associação Brasileira de Normas e Técnica (ABNT) em sua norma NBR - 10004 de 2004 define resíduo sólido como o material no estado semi-sólido ou sólido resultante das áreas das indústrias, de hospitais, de comércios e outras e

acrescentam também nessa denominação alguns líquidos específicos que não devem ser lançados em esgotos ou corpos de água. Esses resíduos sólidos são então classificados em:

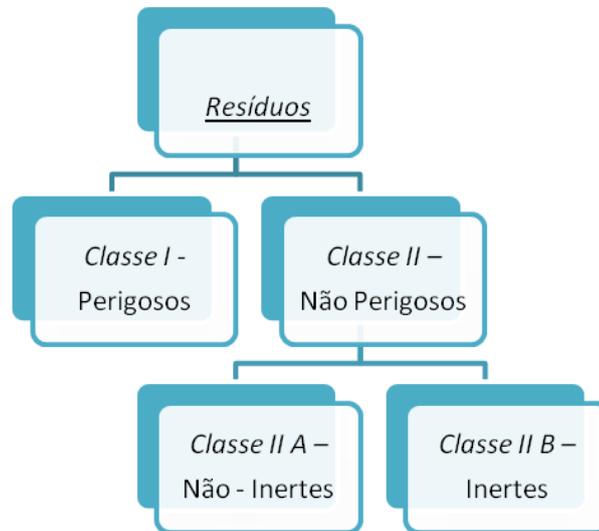


Figura 2.5 - Classificação de resíduos sólidos segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Manhães e Holanda (2008), caracterizaram e classificaram o resíduo sólido de granito em estado de pó retirado da região de Santo Antônio de Pádua, RJ tendo como um dos objetivos a identificação do seu potencial poluidor, de acordo com as normas NRB - 10004, NRB - 10005, NRB - 10006 e NRB - 10007 da ABNT e da norma AWWA-APHA-WPCL. O resíduo em forma de lama foi coletado, em seguida secado ao ar livre e em estufa e por fim peneirado até obter um pó fino. Como o resíduo em pó não constava da lista dos anexos A e B da norma NBR - 10004, o resíduo passou por um teste de lixiviação que comprovou que o resíduo poderia ser classificado como *não perigoso*. O mesmo passou por teste de solubilização como recomenda a NBR - 10006, encontrando resultados superiores aos recomendados pela ABNT para o chumbo, cromo, ferro e manganês presentes no resíduo classificando-o como *não inerte*. Os pesquisadores concluíram então que a concentração de ferro e manganês pode causar turbidez e cor à água quando este resíduo for lançado sobre ela, mas que não prejudicam a produção de cerâmicas convencionais que já empregam esses materiais em suas composições originais; enquanto as grandes concentrações de chumbo e cromo podem se solubilizar em água contaminando o meio ambiente.

2.5 - Tijolo solo-cimento

A ABNT define solo-cimento como o produto endurecido resultante do processo de cura da união de solo, água e cimento compactados em proporções preestabelecidas conforme a NBR 12253 (1992) e executados de acordo com os procedimentos enunciados na NBR 12254 (1990). É um produto conhecido por apresentar boas características como: resistência à compressão, durabilidade e impermeabilidade (Pinheiro e Soares, 2010; Vieira et al., 2007), bem como baixa retração volumétrica, quando submetido à cura adequada.

Há milhares de anos os romanos acrescentaram cal ao solo para utilizar em suas construções e na Mesopotâmia confeccionaram tijolos com solo de cinzas vulcânicas e cal. Muitas obras resistiram ao tempo e às condições climáticas e são visitadas até hoje, como a Muralha da China, a pirâmide de Uxmal e a igreja de Santa Rita em Parati-RJ entre muitas outras construções (Rodrigues, 2008).

Após o solo-cinza sofrer modificações criou-se então o solo-cimento. No final do século XIX, o inglês H. E. Brook Bradley foi o primeiro a utilizar a mistura de solo-cimento no tratamento de leitos de estradas e pistas para veículos de tração animal na região do sul da Inglaterra, comenta Pessoa (2004).

No Brasil as pesquisas com solo-cimento se destacaram após a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) regulamentar a sua aplicação a partir de 1930. Em 1948, a ABCP recomendou o uso do solo-cimento em paredes monolíticas quando publicou o boletim N° 54 – Casa de Paredes de solo-cimento – e por isso no Brasil, o primeiro registro oficial do emprego do solo-cimento em construções foi em 1948 na construção da sede da “Fazenda Inglesa” na cidade de Petrópolis-RJ (Cabala, 2007). Neste mesmo ano foi construído também em Manaus o Hospital Adriano Jorge com paredes monolíticas de solo-cimento com o apoio da ABNT. Em 1978 aproximadamente, o solo-cimento foi empregado em maior escala em construções de casa para moradias após a aprovação de técnicas de construções de habitações populares pelo então Banco Nacional de Habitação (BNH).

Diversas variedades de tijolos solo-cimento são fabricadas no Brasil para atender às necessidades de cada obra como mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Tipos de tijolos de solo-cimento (Lima, 2010).

<i>Tipo</i>	<i>Dimensões</i>	<i>Uso</i>	<i>Exemplo</i>
Tijolo maciço comum	(5 x 10 x 20) cm	Assentamento de alvenaria semelhante ao tijolo convencional	
Tijolo maciço com encaixe	(5 x 10 x 21) cm	Assentamento com baixo consumo de argamassa	
½ tijolo com encaixe	(5 x 10 x 10,5) cm	Elemento para conectar as juntas e amarrações sem necessidade de quebras.	
Tijolo com dois furos e encaixe	(5 x 10 x 20) cm (7 x 12,5 x 25) cm (7,5 x 15 x 30) cm	Assentamento a seco, com cola rança ou argamassa plástica. As tubulações das instalações hidrosanitárias, elétricas e outras, passam pelos furos.	
½ tijolo com furo e encaixe	(5 x 10 x 10) cm (7 x 12,5 x 12,5) cm cm (7,5 x 15 x 15) cm	Elemento para conectar as juntas e amarrações sem necessidade de quebras.	
Caneletas	(5 x 10 x 20) cm (7 x 12,5 x 25) cm (7,5 x 15 x 30) cm	Empregado em execução de vergas, reforços estruturais, cintas de amarração e passagem de tubulações horizontais.	

Lopes (2002) apud Alexandre et al. (2006) afirma que o solo é o componente em maior quantidade responsável por 85 % da composição do solo-cimento. Praticamente todos os solos podem ser usados para a confecção de tijolos de solo-cimento apesar de muitos não serem viáveis por ser preciso incorporar uma quantidade maior de cimento, tornando-se economicamente inviável. São

adicionados água e cimento em proporções adequadas ao solo para formar a massa de solo-cimento, além de ser possível incorporar outros aditivos. A mistura é colocada em uma prensa para ser prensada e formar os tijolos e por fim eles passam por um período de cura por alguns dias, até o tijolo formado adquira uma boa resistência.

2.6 – Vantagens do solo-cimento

O solo-cimento tem sido muito utilizado na alvenaria para construção de edificações por apresentarem muitas vantagens especificadas a seguir, de acordo com Silva (2005), Rodrigues (2008) e Silva (2011):

- A retirada do solo para utilização se realiza em lugares próximos ou no próprio local da obra reduzindo os custos com extração e transporte do mesmo;
- A produção do tijolo não requer mão de obra especializada porque sua tecnologia de construção é simples. Grupos familiares e comunitários podem ser formados reduzindo gastos econômicos e energéticos;
- A alvenaria com tijolos solo-cimento quando comparada à alvenaria de tijolos cerâmicos apresenta bom isolamento térmico, pois a “terra crua” é má condutora de calor e acústico por causa dos seus furos que formam regiões de ar que dificultam a passagem de ondas sonoras.
- As construções com solo-cimento são resistentes ao fogo e mais higiênicas por não proporcionar condições para acomodação e propagação de insetos nocivos à saúde;
- Muito resistentes ao desgaste e à umidade reduzindo os gastos com manutenção visto que sua resistência é alta e apresenta boa impenetrabilidade;
- As peças prensadas apresentam faces lisas que requerem apenas uma pintura simples para aumentar a impermeabilidade da parede e, por conseguinte não precisa de nenhum revestimento como emboço, por exemplo;
- O gasto com energia é bastante reduzido por não ser necessário queimar as peças produzidas, principalmente quando comparadas ao processo de produção por prensagem manual.

Como existe uma grande variedade de solo, faz-se necessário realizar ensaios de caracterização de solo para preparar uma boa mistura final de solo-cimento. Essa diversidade de solos torna-se então uma desvantagem na utilização do solo-cimento, afirma Silva (2005).

2.7 - Matérias primas para a fabricação de tijolos solo-cimento

2.7.1– Solo

Há pelo menos dez mil anos o solo tem sido utilizado como material de construção nas culturas antigas como a grega e a romana. Antigamente os abrigos para proteger o homem das ações do meio ambiente eram feitos por construções com terra utilizando apenas o solo. O escrito mais antigo de uma construção com terra é de 5000 a.C. na Mesopotâmia com adobe e em 4500 a.C. quando foi encontrado um novo registro de construção com terra estabilizada, ou seja, terra misturada com cinzas e moldadas com adobe (Pereira e Pezzuto, 2010).

No Brasil as construções de terra do período colonial foi herança dos portugueses e africanos.

Com o tempo, o homem aprendeu a melhorar as características da terra, visto que nem todos os solos eram adequados para a construção, empregando técnicas construtivas e adicionando materiais para sua estabilização como palha, cimento, o asfalto e a cal, entre outros, cada um com uma função específica (Neves, 2006).

A adição de asfalto natural ou palha na produção de adobes é uma prática milenar usada para diminuir a sua permeabilidade ou reduzir a sua retração, comprovando que a estabilização da terra não é um procedimento recente. Atualmente é feita a estabilização por cimentação, por armação, por impermeabilização, granulométrica ou por tratamento químico (Neves et al., 2005).

Segundo Pinto (1998) apud Grande (2003), o solo é um conjunto de partículas sólidas resultantes da desagregação de rochas por ações físicas ou químicas com água (ou outro líquido) e ar em seus espaços intermediários (Figura 2.6).

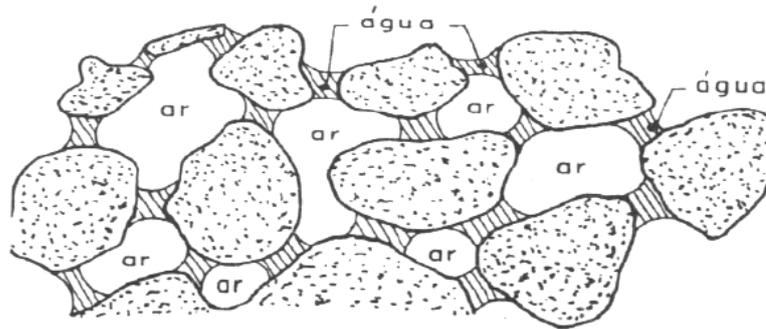


Figura 2.6 – Estrutura do solo (fases sólida, líquida e gasosa) (Grande, 2003).

As frações do solo são constituídas de partículas de vários tamanhos e apresentam diferentes nomenclaturas relacionadas à granulometria de suas partículas sólidas.

Na Tabela 2.5 estão relacionadas as designações próprias de acordo com a Escala Granulométrica Brasileira (ABNT) e da escala utilizada pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

Tabela 2.5 – Divisões do solo de acordo com algumas escalas (Cabala, 2007).

<i>Divisões do solo</i>	<i>ABNT</i>	<i>Divisões do solo</i>	<i>USDA</i>
		Areia muito grossa	1- 2 mm
		Areia grossa	0,5 – 1 mm
Areia	0,05 – 4,8 mm	Areia média	0,25 - 0,5 mm
		Areia fina	0,1- 0,25 mm
		Areia muito fina	0,05 – 0,1 mm
Silte	0,005 – 0,05 mm	Silte	0,002 – 0,06 mm
Argila	Menor que 0,005 mm	Argila	Menor que 0,002 mm

Agentes atmosféricos, água, variações de temperatura e decomposições químicas que sempre atingem a superfície terrestre, são os responsáveis pela transformação de rochas em solo. Segundo Azambuja (1979) apud Grande (2003) esse processo é conhecido como intemperismo e é responsável pela criação de

várias camadas. Essas camadas são classificadas em horizontes e diferenciadas por letras em que A representa a camada superficial, B o subsolo e C a camada profunda. Vieira (1975) apud Cabala (2007) subdivide esses horizontes em subhorizontes como mostrado na Figura 2.7.

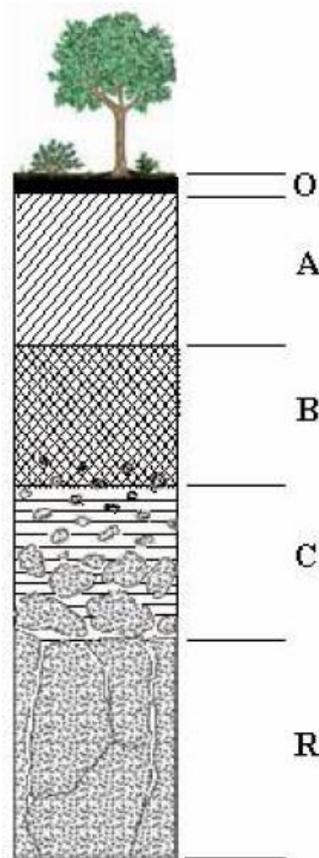


Figura 2.7 - Divisão dos horizontes no solo (Cabala, 2007).

Horizonte O: Superfície com alta concentração de matéria orgânica.

Horizonte A: Normalmente de cor escura pela presença de matéria orgânica e apresenta perda de argilas minerais, ferro e alumínio;

Horizonte B: Contém muito acúmulo de argilas silicatadas minerais ou de ferro.

Horizonte C: Material de origem residual.

Horizonte R: chamado de R de “rock” é a rocha matriz.

É importante conhecer o perfil do solo e suas divisões ao empregar um solo pertencente a um desses horizontes no desenvolvimento de solo-cimento. De acordo com Azambuja (1979) apud Grande (2003) no horizonte A é possível encontrar celulose que é um material inerte e húmus que é um ácido orgânico que apresenta afinidade química com a cal livre (CaO) liberada no processo de

hidratação do cimento e que pode afetar a resistência do material; se isso acontecer é necessário adicionar cal no solo antes da adição de cimento. No horizonte B o solo tem característica argilosa e de difícil destorroamento o que consiste em um problema no processo de homogeneização da mistura do solo-cimento. No horizonte C encontram-se os solos com as melhores características para o emprego no solo-cimento por serem arenosos e de destorroamento fácil apesar de poderem conter partículas friáveis que exige um estudo de dosagem ideal antes de sua utilização.

Quase todos os solos podem ser estabilizados com cimento e usados para a produção de solo-cimento, porém os mais utilizados do ponto de vista econômico são os que precisam de baixos teores de cimento para a sua estabilização, afirma Ferreira et al. (2008).

2.7.2 - Água

O Brasil é um país privilegiado por concentrar uma grande quantidade de água doce e receber chuvas abundantes na maior parte de seu território. Porém esse recurso tem sido mal cuidado e mal conservado por causa do seu uso inadequado e pela poluição lançada sobre os rios. Isso tem acarretado grande desigualdade na distribuição de água no país e a região Sudeste que apresenta a maior concentração da população, tem disponível apenas 6 % do total de água do país. Para a produção de tijolos modulares de solo-cimento a ABNT em sua norma NBR 10832 de 1992, recomenda utilizar a água isenta de impurezas para que a mesma não prejudique a hidratação do cimento.

2.7.3 - Cimento

Derivada do latim *caementun*, a palavra cimento era utilizada pelos romanos para nomear as cinzas vulcânicas das ilhas gregas da região de Pozzuoli composta por cal com pozolana (Lima, 2010) e foi muito empregada nas obras de alvenaria, pontes e aquedutos (Grande, 2003); (Rodrigues, 2008).

O cimento Portland teve sua origem na Inglaterra quando o engenheiro John Smeaton por volta de 1756 procurou um aglomerante que endurecia em presença de água para reconstrução de um farol na Inglaterra (Santos, 2004). Em 1824, o cimento Portland foi patenteado pelo inglês Joseph Aspdin, após ele obter um pó

fino resultante da queima de argila adicionada de pedras calcárias que depois de sofrerem um processo de secagem, tornaram-se muito duras, como as pedras utilizadas em construções da época, e não se dissolviam em água. Este pó foi denominado então cimento Portland por causa de sua cor e suas propriedades de durabilidade e solidez iguais às das rochas da ilha britânica de Portland (SNIC, 2006).

Carvalho (2008), afirma que o concreto é provavelmente o material sólido mais abundante de todos os outros produzidos e que o cimento Portland ou hidráulico é o componente-chave do setor da construção civil de um país.

A Associação Brasileira de Cimento Portland citada por Cabala (2007), define cimento Portland como um pó fino que apresenta propriedades aglutinantes, aglomerantes ou ligantes e por isso quando é submetido à água endurece e não se decompõe quando incorporado à água novamente. Para Grande (2003) o cimento é um aglomerante hidráulico adquirido pela moagem do clínquer com adição de gesso e outras substâncias que, ao serem adicionadas, determinam o tipo de cimento produzido. O gesso incorporado controla o tempo inicial de hidratação do cimento e, o clínquer, (Figura 2.8) é obtido após o processo de clínquerização sofrido pela mistura de calcário, argila e uma pequena quantidade de minério de ferro.



Figura 2.8 – Clínquer na sua forma original (Santos, 2004).

O principal componente presente em qualquer tipo de cimento Portland produzido é o clínquer e a ele é feita adições. O clínquer é composto por vários compostos anidros como a alita ou silicato tricálcico (C_3S), belita ou silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferrita ou ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). As características de cada um desses compostos são de grande importância para a

preparação dos tijolos de solo-cimento porque na mistura de solo-cimento o cimento Portland é o material ligante. De acordo com Grande (2003) as principais características de cada componente do clínquer são:

Alita: desenvolve resistência nos períodos iniciais;

Belita: proporciona resistência em idades mais avançadas e libera pouco calor;

Aluminato Tricálcico: sua reação ocorre nos primeiros minutos e produz elevado calor de hidratação;

Ferrita: a resistência mecânica é desenvolvida por um processo lento e pequeno e apresenta boa resistência aos sulfatos.

Dependendo das outras matérias primas adicionadas e misturadas ao clínquer durante o processo de moagem são produzidos os diversos tipos de cimento Portland. As adições feitas ao cimento são de gesso, escórias de alto-forno, materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos como demonstrado no organograma da Figura 2.9. O gesso controla o tempo de endurecimento do clínquer quando é adicionada água a ele e está presente em todos os cimentos porque sem ele o cimento endureceria praticamente no mesmo instante que usado; As escórias de alto-forno assemelham-se aos grãos de areia e é resultante da produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e proporciona maior durabilidade e maior resistência final; os materiais pozolânicos são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas entre outros materiais com propriedade de ligante hidráulico e por fim, as rochas moídas que apresentam carbonato de cálcio em sua formulação como o calcário, e que representa os materiais carbonáticos responsáveis por tornar o cimento mais trabalhável funcionando como um bom lubrificante (Carvalho, 2008).

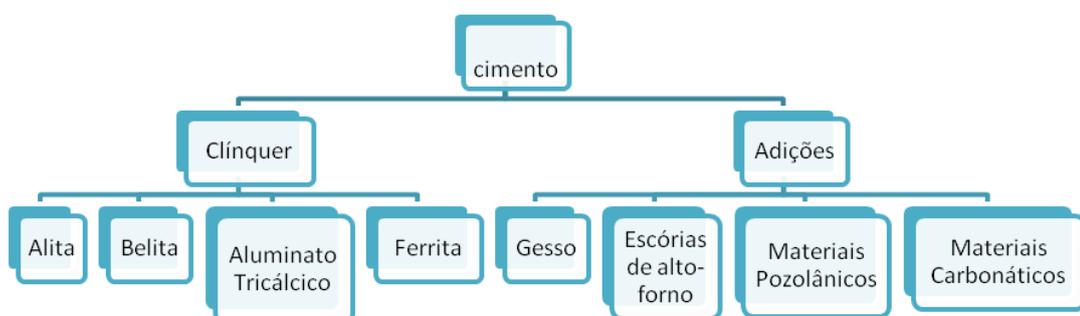


Figura 2.9 – Composição do cimento Portland com suas possíveis adições (adaptado ABCP, 2002).

No Brasil existem diversos tipos de cimento classificados pela Associação Brasileira de Cimento Portland. Eles são nomeados pela sigla CP seguidos de um número romano de I a V de acordo com sua composição. Pode também ser adicionada na sua classificação a resistência mínima à compressão em MPa por valores iguais a 25, 32 e 40 alcançado após um período de cura de 28 dias. A Tabela 2.6 relaciona as nomenclaturas dos cimentos mais comuns.

Tabela 2.6 – Classificação do Cimento Portland (ABCP, 2002).

<i>Sigla</i>	<i>Nomenclatura</i>	<i>Norma da ABNT</i>
CP I	Cimento Portland Comum	NBR 5732
CP I – S	Cimento Portland Comum com adição	NBR 5732
CP II – E	Cimento Portland composto com escória	NBR 11578
CP II – Z	Cimento Portland composto com pozolana	NBR 11578
CP II – F	Cimento Portland composto com fíler (calcário)	NBR 11578
CP III	Cimento Portland de alto-forno	NBR 5735
CP IV	Cimento Portland pozolânico	NBR 5736
CP V – ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial	NBR 5733

De acordo com a ABCP (2002) outros tipos de cimento também são fabricados em menor escala por apresentarem menor procura e um consumo mais específico. Estes são classificados em Cimento Portland resistentes ao sulfato, Cimento Portland de baixo calor de hidratação, Cimento Portland branco (estrutural e não estrutural) e Cimento para poços petrolíferos especificados nas normas NBR 5737, NBR 13116, NBR 12989 e NBR 9831, respectivamente.

Atualmente o Cimento Portland composto é o mais consumido no país chegando aos 75 % de toda a produção.

Compreendendo os tipos de cimento e suas propriedades tecnológicas, aliadas ao entendimento correto das variáveis que constituem o solo, é possível ampliar as possibilidades de se desenvolver um material de solo-cimento com ótimo desempenho, afirma Grande (2003).

2.8- Etapas de fabricação do tijolo solo-cimento

No processo de fabricação de tijolos de solo-cimento várias etapas são seguidas como mostrado na Figura 2.10.

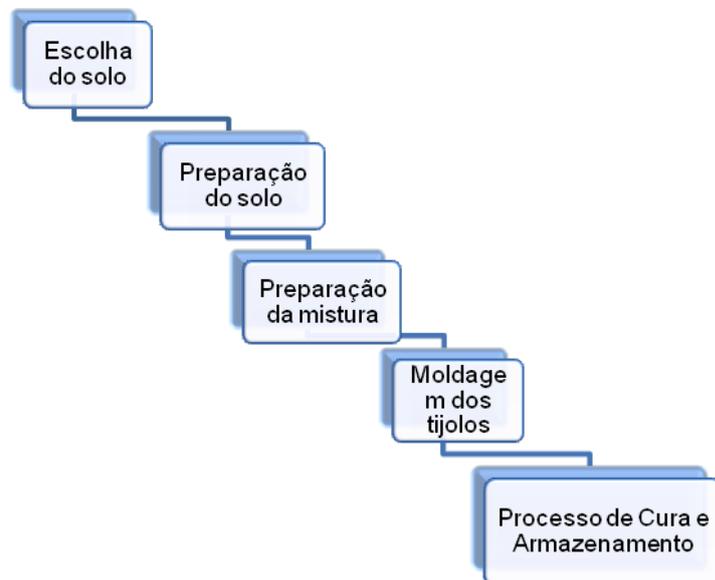


Figura 2.10 – Fluxograma do processo de fabricação de tijolos do tipo solo-cimento (Silva, 2013).

O processo de escolha do solo é importante porque o mesmo é adicionado em maior quantidade, e de acordo com suas características poderá ocorrer uma mistura com outros tipos de solos para melhorar as suas propriedades para então serem adicionados o cimento e água. Os solos arenosos precisam de teores menores de cimento para se estabilizar quando comparados com os solos argilosos.

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (1986) a mistura de solo, cimento e água deve apresentar uma faixa de 5 % a 10 % de cimento no solo para que o mesmo seja estabilizado e ganhe resistência. O solo mais indicado deve possuir entre 45 % e 50 % de areia e um teor de matéria orgânica baixo que não seja capaz de prejudicar as características exigidas pela norma NBR 10834 da ABNT (1994).

A Associação Brasileira de Cimento Portland ABCP (1985), define os parâmetros necessários do solo para a produção de tijolos maciços de solo-cimento resumidas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Características do solo para a fabricação de tijolos de solo-cimento segundo a ABCP (1985).

<i>Características</i>	<i>Requisito (%)</i>
% de solo que passa na peneira ABNT 4,8 mm (Nº 4)	100
% de solo que passa na peneira ABNT 0,074 mm (Nº 200)	10 – 50
Limite de liquidez (LL)	≤ 45
Limite de Plasticidade (LP)	≤ 18
% de areia	50 - 70
% de silte	10 - 20
% de argila	10 - 20

Para a preparação do solo são feitos o seu destorroamento e peneiramento. Em seguida é adicionado cimento ao solo e promovida a mistura e homogeneização dos produtos secos. Por fim é adicionada água à mistura até atingir a mesma umidade em toda a massa, encerrando assim o processo de preparo da mistura, de acordo com Silva (2011).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece na norma NBR 10836 (1994), os valores que devem ser alcançados após os ensaios de resistência à compressão e absorção de água, para os tijolos de solo-cimento apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Valores de resistência à compressão e absorção de água para tijolo de solo-cimento (ABNT, 1994).

<i>Valores limites (após 28 dias de cura)</i>	<i>Média</i>	<i>Requisito (%)</i>
Resistência à compressão (MPa)	≥ 2,0	≥ 1,7
Absorção de água (%)	≤ 20	≤ 22

Na produção de tijolos, o equipamento utilizado para moldar o tijolo é fundamental, pois é no processo de prensagem que ocorre o empacotamento dos grãos de solo resultando em um produto de baixa porosidade e alta densidade, afirma Silva (2011).

A moldagem dos tijolos pode ser feita em prensas manuais, hidráulicas ou mecânicas como na Figura 2.11.

(a)

(b)



Figura 2.11 – Prensas mecânicas disponíveis no mercado para a produção de tijolos solo-cimento. Prensa automática (a) e manual (b) (Destefani, 2009).

Durante a cura, os tijolos precisam ser molhados pelo período de sete dias para que os mesmos se conservem úmidos. O processo de cura do tijolo de solo-cimento tem por objetivos: evitar que a água de amassamento e hidratação do cimento, localizada na superfície do tijolo, se dissipe; manter um controle da temperatura do material até que o mesmo obtenha o nível de resistência almejado e fornecer mais água durante as reações de hidratação quando necessário.

2.9- Utilização do resíduo de rochas ornamentais para a produção de tijolos modulados de solo-cimento.

Faganello (2006) investigou as características de corpos de prova de solo-cimento incorporados com rejeitos de brita. Duas amostras que apresentavam dimensões diferentes do resíduo foram produzidas: a amostra de N^o 1 (A1) que utilizou rejeitos com dimensões inferiores a 4,8 mm e a amostra N^o 2 (A2) com dimensões inferiores a 6,3 mm. As duas amostras apresentaram valores próximos para o limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade, o qual indica que ambas são úteis para a correção granulométrica do solo. Foram moldados três

corpos de prova seguindo a norma NBR 12024/92 para o ensaio de compactação utilizando 5 %, 7 % e 9 % de teor de cimento, cujos resultados de resistência à compressão são mostrados nas Figuras 2.12 e 2.13.

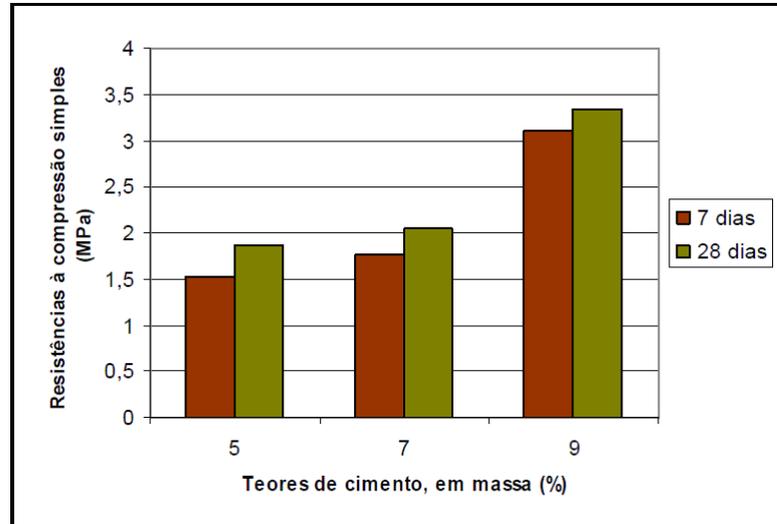


Figura 2.12 – Resistência à compressão simples da mistura MA1. (Faganello, 2006).

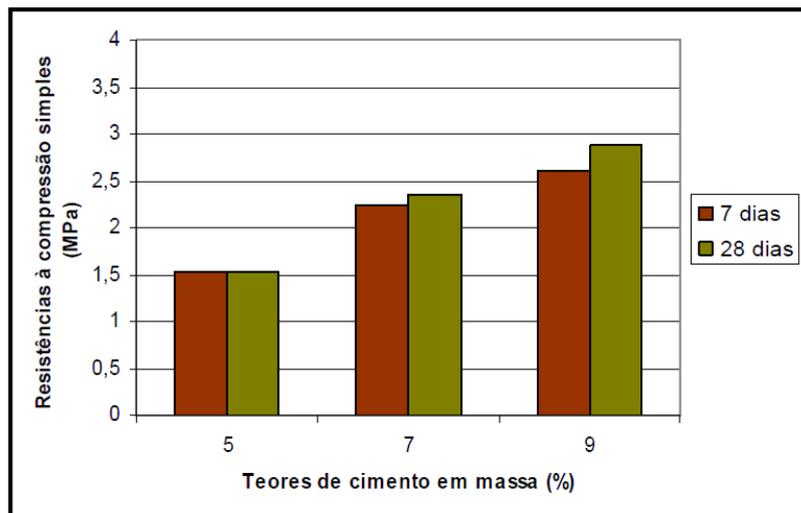


Figura 2.13 – Resistência à compressão simples da mistura MA2. (Faganello, 2006).

Os resultados mostraram que a resistência à compressão das amostras aumenta à medida que se aumenta o teor de cimento. Na comparação de teor de cimento para estabilizar o solo, ficou evidente que a quantidade de cimento diminuiu de 15 %, ao formar a mistura solo-cimento, para 9 % e 7 % nas adições das misturas MA1 e MA2, respectivamente, demonstrando a eficácia na utilização do resíduo para produção de solo-cimento.

Faganello (2006) também mostrou que o teor de 9 % apresenta maior resistência e, estatisticamente, a resistência de 28 dias também é maior que a resistência aos 7 dias, concluindo que a idade de cura e o teor de cimento na massa são fatores de influência na resistência do solo-cimento.

Apesar de ter produzido poucos corpos de prova, Faganello (2006) encontrou resultados satisfatórios com a incorporação das amostras A1 e A2 de resíduo de brita no solo-cimento melhorando positivamente a granulometria do solo e, por conseguinte, melhorando a estabilização da matriz de solo-cimento.

Miranda (2007) estudou a viabilidade técnica da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento, com a finalidade de melhorar o desempenho do material. Na formulação de suas misturas, medidas em massa, o resíduo e o cimento foram adicionados em função da massa de solo. Ele estudou a incorporação de 5 %, 10 % e 15% de cimento e 0 %, 10 %, 15 % e 30 % de resíduo, totalizando um estudo de 12 famílias. Miranda (2007) produziu 144 peças de corpos-de-prova cilíndricos para as doze famílias pesquisadas, sendo seis peças para a verificação da absorção de água e seis peças para a determinação da resistência à compressão. Das seis peças, três foram analisadas aos sete dias de idade e as outras três aos 28 dias. Foram produzidas também mais 144 peças de tijolos solo-cimento e realizados os mesmos ensaios dos corpos-de-prova.

Em seus resultados, Miranda (2007), verificou que para os corpos-de-prova com incorporação de 5 % de cimento, apenas a composição com 30 % de resíduo alcançou valores satisfatórios em relação à absorção de água. Quanto aos resultados do ensaio de resistência à compressão, nenhuma composição atendeu às recomendações da norma NBR 8491 (ABNT, 1984), concluindo que o traço pobre em cimento (5 %) não deve ser empregado em alvenaria estrutural.

Os resultados encontrados por Miranda (2007) para os ensaios de absorção de água e resistência à compressão dos corpos-de-prova, com incorporação de 10 e 15 % de cimento, encontram-se nas Tabelas 2.9 e 2.10, respectivamente.

Foi observado na Tabela 2.9, que a composição com 0% de resíduo, analisada aos sete e 28 dias, e a composição com 10 % de resíduo, analisada aos sete dias, não atenderam às condições determinadas pela NBR 8491 (ABNT, 1984), em relação aos valores da média das absorções de água, enquanto todos atingiram bons resultados de resistência à compressão.

Tabela 2.9 – Absorção de água e Resistência à compressão simples dos tijolos solo cimento com 10 % de cimento (Miranda, 2007).

<i>Corpos de prova incorporados com 10 % de cimento</i>			
Resíduo	Cura	Absorção de água (%)	Resistência a compressão (MPa)
0 %	7 dias	20,46	3,10
	28 dias	20,45	3,29
10 %	7 dias	21,27	2,12
	28 dias	19,09	2,74
15 %	7 dias	19,99	2,89
	28 dias	19,52	3,71
30 %	7 dias	19,80	3,08
	28 dias	19,52	2,86

A Tabela 2.10 apresenta os valores obtidos no ensaio de absorção de água e resistência à compressão dos corpos-de-prova cilíndricos produzidos com 15% de cimento. Verificou-se que todas as composições adquiriram resultados satisfatórios de resistência à compressão. Em relação aos resultados referentes à absorção de água, Miranda (2007) observou que a composição sem adição de resíduo, após cura de 7 dias adquiriu boa absorção de água e os traços com 15 e 30 % de resíduo, encontraram-se dentro dos valores estabelecidos em norma após cura de 7 e 28 dias.

Miranda (2007) verificou que, com o aumento do teor de cimento e do resíduo, ocorreu uma pequena redução nos valores de absorção de água dos corpos-de-prova cilíndricos. Em relação à resistência à compressão, foi observado que os corpos-de-prova compostos com 15% de resíduo obtiveram os maiores valores de resistência à compressão e à medida que aumenta a porcentagem de resíduo, há uma tendência de ganho de resistência.

Tabela 2.10 – Absorção de água e Resistência à compressão simples dos tijolos solo cimento com 15 % de cimento (Miranda, 2007).

<i>Corpos de prova incorporados com 15 % de cimento</i>			
Resíduo	Cura	Absorção de água (%)	Resistência a compressão (MPa)
0 %	7 dias	19,91	4,14
	28 dias	21,21	3,86
10 %	7 dias	21,63	3,20
	28 dias	20,76	4,52
15 %	7 dias	19,35	4,58
	28 dias	18,48	5,60
30 %	7 dias	19,30	4,03
	28 dias	18,94	4,10

Miranda (2007) também analisou a absorção de água e à resistência à compressão de tijolos de solo-cimento e concluiu que o desempenho dos corpos-de-prova cilíndricos foi inferior aos dos tijolos devido ao grau de compactação alcançado na moldagem dos cilindros. Todos os tijolos produzidos com os teores de 10% e 15% de cimento ultrapassaram os valores mínimos estabelecidos na NBR 8491 (ABNT, 1984), quanto à resistência à compressão simples e a capacidade de absorção de água.

Por fim, Miranda (2007) concluiu que, a adição do resíduo proveniente de beneficiamento de mármore e granito, possibilitou condições técnicas favoráveis para se produzir tijolos prensados de solo-cimento com qualidade e redução no consumo de cimento.

Mota et al. (2010) estudaram o potencial do resíduo de granito ao ser incorporado no processo de fabricação de tijolos modulares do tipo solo-cimento. Foi utilizado o traço 1:9, que foi subdividido nas seguintes proporções: 1:7:2; 1:6:3; 1:5:4, 1:4,5:4,5, representando cimento, solo e resíduo de granito, respectivamente. Foram fabricados 18 tijolos para cada composição com dimensões de 0,25 m de comprimento, 6,5 m de altura e 12,5 m de largura cada, seguindo as recomendações da Norma Brasileira NBR 10832. Para cada proporção também foram analisados os fatores água/cimento 0,72; 0,86 e 1,00. A Tabela 2.11 mostra a composição química

do resíduo dando destaque à grande concentração de cal (40,67 %) que provavelmente é proveniente da cal utilizada na lama abrasiva.

Tabela 2.11 – Análise química do resíduo de granito (Mota et al., 2010).

Óxidos	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Outros Óxidos	PF
%	40,67	14,60	8,74	5,85	1,89	1,59	1,43	1,19	24,04

Mota et al. (2010) compararam os resultados da absorção de água de cada composição após os períodos de cura de 7, 28 e 60 dias, respectivamente e obtiveram os valores registrados na Figura 2.14.

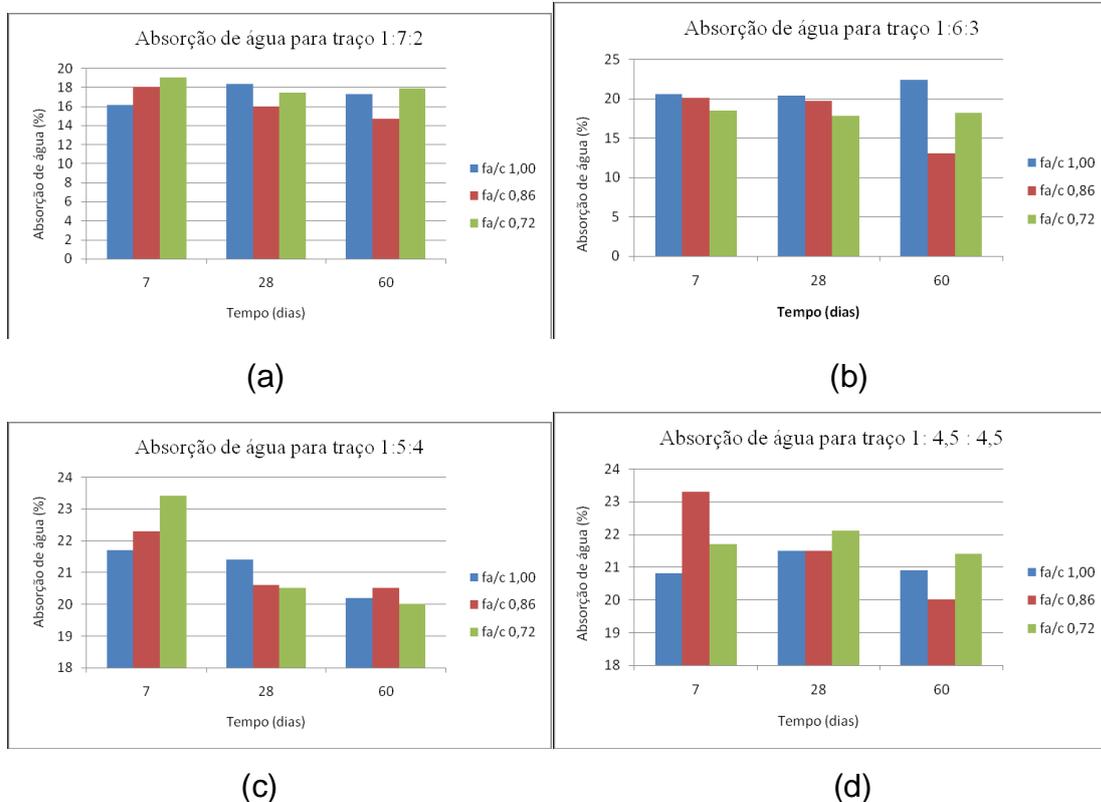


Figura 2.14 – Teores de absorção de água (a) Traço 1: 7: 2 (b) Traço 1: 6: 3 (c) Traço 1 : 5: 4 e Traço 1: 4,5: 4,5 (Mota et al., 2010).

Foi verificado que o traço 1: 4,5: 4,5 obteve valores de absorção de água superiores a 20 %, que é o valor máximo determinado pela ABNT na Norma NBR 10836. O resultado mais satisfatório foi encontrado no traço 1: 7: 2. À medida que foi incorporado mais quantidade de resíduo de granito, observou-se um aumento também da absorção de água. Por conseguinte, a quantidade de vazios na peça é aumentada provocando uma diminuição da sua resistência à compressão simples.

Mota et al. (2010) após determinarem o teor de absorção de água para cada amostra concluíram que sob o ponto de vista econômico o teor de mistura 1:6:3 obteve melhor resultado para o fator água/cimento 0,72 porque utilizou menor quantidade de água e manteve seu nível de absorção de água abaixo de 20 %, além de utilizar uma boa porcentagem de resíduo em sua composição, 30 %.

Lima et al. (2010) estudaram a durabilidade de tijolos ecológicos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito. Em suas pesquisas eles utilizaram o resíduo de granito proveniente de indústrias situadas no distrito industrial de Campina Grande-PB. A lama abrasiva sofreu secagem natural durante 7 dias ao ser exposta ao ar em temperatura ambiente. O material seco foi beneficiado em peneira ABNT nº 80 (0,018 mm) por via seca, e em seguida, caracterizado através da determinação de sua distribuição granulométrica, análise química por fluorescência de Raios X e difração de Raios X.

Os resultados de composição química do resíduo de granito são apresentados na Tabela 2.12. O resíduo de granito apresenta alto teor de sílica (59,56 %).

Tabela 2.12 – Composição química (% em massa) do resíduo de granito (Lima et al., 2010).

<i>Óxidos</i>	<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>K₂O</i>	<i>MgO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>Outros Óxidos</i>
%	6,14	59,56	6,58	16,46	4,16	2,82	2,32	1,96

Foram feitos tijolos de 0,25 m de comprimento, 0,55 m de altura e 0,125 m de largura e estabelecidos o traço de 1:9 relacionados com a quantidade de cimento/solo incorporados com 30 %, 40 % e 50 % de resíduo de granito. A relação água/ cimento adotados foi de 1,5 com base na boa umidade do solo. Após passar por um período de cura de 7 e 28 dias foi analisada a absorção de água do tijolo para cada período específico (Tabela 2.13). Foi observado que com a adição de resíduo houve um aumento na quantidade de água absorvida por causa da elevada quantidade de quartzo e feldspato encontrados no resíduo que causaram um aumento na porosidade do tijolo de solo-cimento. Foi verificado também que os valores de absorção de água estão dentro dos limites especificados pela norma NBR 10834/94 correspondente a ≤ 20 %.

Tabela 2.13 – Valores obtidos de absorção de água (%) (Lima et al., 2010)

<i>Teor de Resíduo</i>	30 %	40 %	50 %
7 dias	17,81	17,79	18,89
28 dias	16,18	17,92	17,57

Os tijolos foram submetidos a um processo de envelhecimento acelerado utilizando um ensaio de durabilidade por molhagem e secagem realizadas repetitivamente. Foi calculada a sua resistência à compressão simples para o período de 28 dias de cura para os dois tipos de corpos de prova: o normal e os que sofreram envelhecimento, obtendo os valores apresentados na Tabela 2.14.

Tabela 2.14 – Resultados de Resistência a Compressão simples (MPa) (Lima et al., 2010).

<i>Teor de Resíduo</i>	30 %	40 %	50 %
Normal	1,3	1,2	1,1
Envelhecido	1,2	1,5	0,7
Varição (Δ_{RCS})	8 %	- 25 %	36 %

Lima et al. (2010) compararam a resistência do tijolo em relação ao período de cura e comprovaram que o período maior de cura de 28 dias aumentou a resistência do material. Também observaram que a resistência foi diminuída com o aumento da quantidade de resíduo de granito. Para as amostras com 50 % de resíduos após sofrerem desgaste, apresentaram uma redução considerável de 36 % em relação às amostras que foram submetidas por um processo de cura normal. As amostras com incorporação de 40 % de resíduo que passaram por processo de desgaste apresentou aumento em sua resistência, atingindo assim uma variação igual a – 25 %, indicando que as amostras não sofreram degradação do sistema.

Observou-se também que as amostras com 50 % de resíduo, após sofrerem desgaste, sofreram uma perda de massa considerável de mais de 20 % e variação de volume acima de 16 %, como apresentado nas Figuras 2.15 e 2.16, respectivamente, verificando assim o envelhecimento desta amostra.

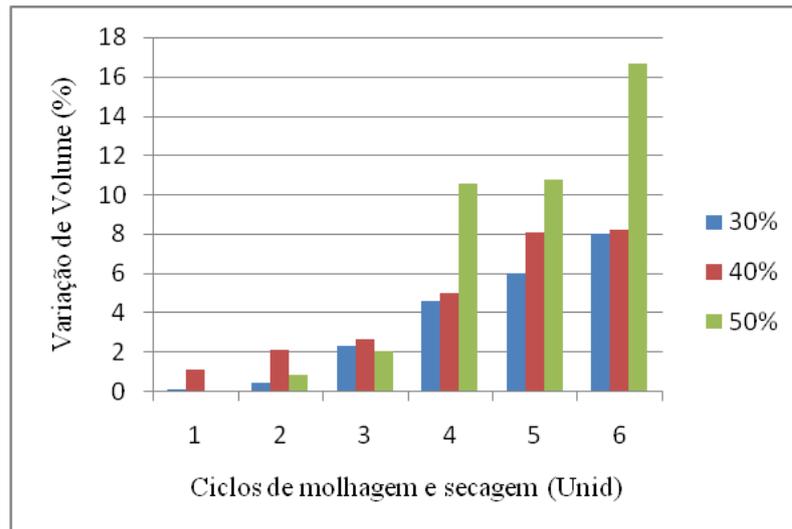


Figura 2.15 – Variação de volume dos tijolos ecológicos com resíduo de granito (Lima et al., 2010).

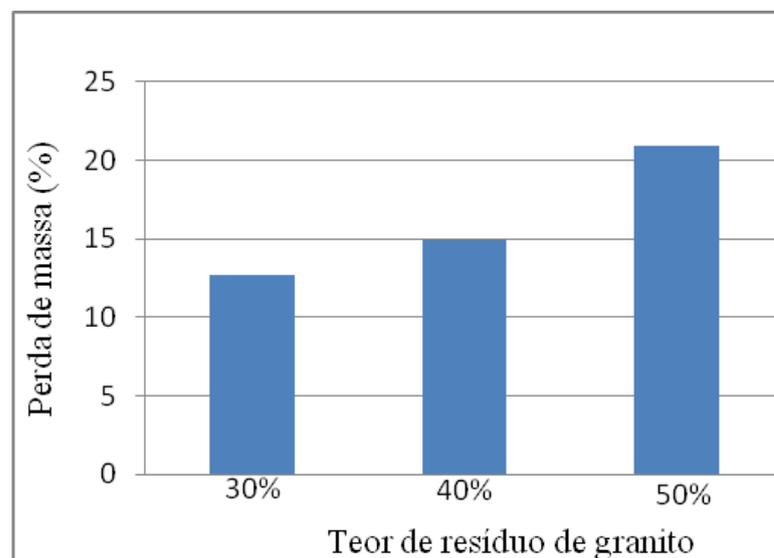


Figura 2.16 – Perda de massa dos tijolos ecológicos com resíduo de granito (Lima et al., 2010).

Lima et al. (2010) concluíram que o resíduo de granito apresentou elevado teor de sílica, alumina, óxido de ferro e de cálcio e as fases mineralógicas composta por mica, feldspato e quartzo. Ao ser incorporado no tijolo solo-cimento ficou evidente o aumento na absorção de água e na perda de massa e variação de volume do tijolo à medida que o teor do resíduo foi aumentado. Concluíram também que os tijolos com 50 % de resíduo apresentaram maior perda da resistência após passar por ciclos de envelhecimento.

Lima (2010) em seu estudo realizou testes em tijolos solo-cimento de dimensões 0,25 m de comprimento 0,70 m de altura e 0,125 m de largura incorporados com resíduos obtidos da serragem de granito de composição química indicada na Tabela 2.8. Ele realizou testes de absorção de água para misturas de cimento + solo para os traços de 1:9; 1:10 e 1: 12, e incorporando 30, 40 e 50 % de resíduo em substituição ao solo para cada traço, obtendo os resultados apresentados na Tabela 2.15.

Tabela 2.15 – Absorção de água com tijolos incorporados com resíduo de granito para idade de cura de 7 e 28 dias (Lima, 2010).

Absorção de água (%)

Traço	Composição da porção solo + resíduo de granito	7 dias (Normal)	28 dias (Normal)	28 dias (Envelhecido)
1: 9	30 % de resíduo de granito	17,8	16,8	16,1
	40 % de resíduo de granito	17,8	17,7	17,0
	50 % de resíduo de granito	18,9	17,6	19,1
1: 10	30 % de resíduo de granito	17,3	15,3	16,5
	40 % de resíduo de granito	20,4	17,2	17,6
	50 % de resíduo de granito	22,1	20,0	21,5
1: 12	30 % de resíduo de granito	18,5	15,9	19,1
	40 % de resíduo de granito	20,5	17,8	19,9
	50 % de resíduo de granito	22,0	20,0	22,0
NBR 10934/94				≤ 20 %

Lima (2010) verificou que apenas o tijolo solo-cimento com traço 1: 12 e 50 % de resíduo não cumpriu as exigências da ABNT para o teste de absorção de água apresentando um valor superior a 20 %.

Ele realizou também ensaio de resistência à compressão para os mesmos traços e obteve os resultados registrados na Tabela 2.16.

Tabela 2.16 – Resistência à compressão simples dos tijolos solo cimento com resíduo de granito (Lima, 2010).

Resistência à compressão Simples (MPa)

Traço	Composição da porção solo + resíduo de granito	7 dias (Normal)	28 dias (Normal)	28 dias (Envelhecido)
1: 9	30 % de resíduo de granito	0,9	0,9	1,2
	40 % de resíduo de granito	0,9	1,2	1,5
	50 % de resíduo de granito	1,0	1,1	0,7
1: 10	30 % de resíduo de granito	0,7	1,6	1,0
	40 % de resíduo de granito	0,5	0,9	1,4
	50 % de resíduo de granito	0,3	0,5	0,4
1: 12	30 % de resíduo de granito	0,3	0,3	0,5
	40 % de resíduo de granito	0,4	0,5	0,5
	50 % de resíduo de granito	0,4	0,7	0,7
NBR 10834/94				≤ 2,0 MPa

Em relação aos valores da resistência à compressão simples, Lima (2010) percebeu uma diminuição da resistência com o aumento do teor do resíduo.

Os valores registrados para os ensaios de absorção de água e resistência à compressão com os tijolos foram inferior aos parâmetros da ABNT NBR 10834/94 e diferentes dos resultados com os corpos de prova cilíndricos com os mesmos traços. Isso se justifica por causa da geometria dos tijolos vazados que favorece uma concentração de tensão nas bordas do tijolo. Foi concluído por Lima (2010) que: os corpos de prova incorporados com 30 % de resíduo de granito apresentaram os melhores resultados de seus ensaios; quando incorporado o resíduo em proporção moderada percebe-se uma melhora nas propriedades de resistência, absorção e durabilidade do solo-cimento e verifica-se a necessidade de uma norma para regular e oferecer parâmetros tecnológicos na utilização de materiais alternativos adicionados ao solo-cimento.

Com base no exposto anteriormente, existem poucos trabalhos na literatura sobre a incorporação de resíduo de rocha ornamental em tijolo solo-cimento. O presente trabalho de dissertação de mestrado pretende contribuir para agregar mais informações sobre este tópico. Em particular, o trabalho pretende agregar mais

informações sobre o reuso de resíduo de rocha ornamental proveniente da região de Campos dos Goytacazes na produção de tijolo solo-cimento com ênfase nas propriedades tecnológicas e microestrutura dos corpos curados.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos aplicados nesta dissertação de mestrado, que envolve diversas etapas relacionadas às matérias-primas, o processamento e os ensaios que serão utilizados. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma experimental que foi desenvolvido na presente dissertação.

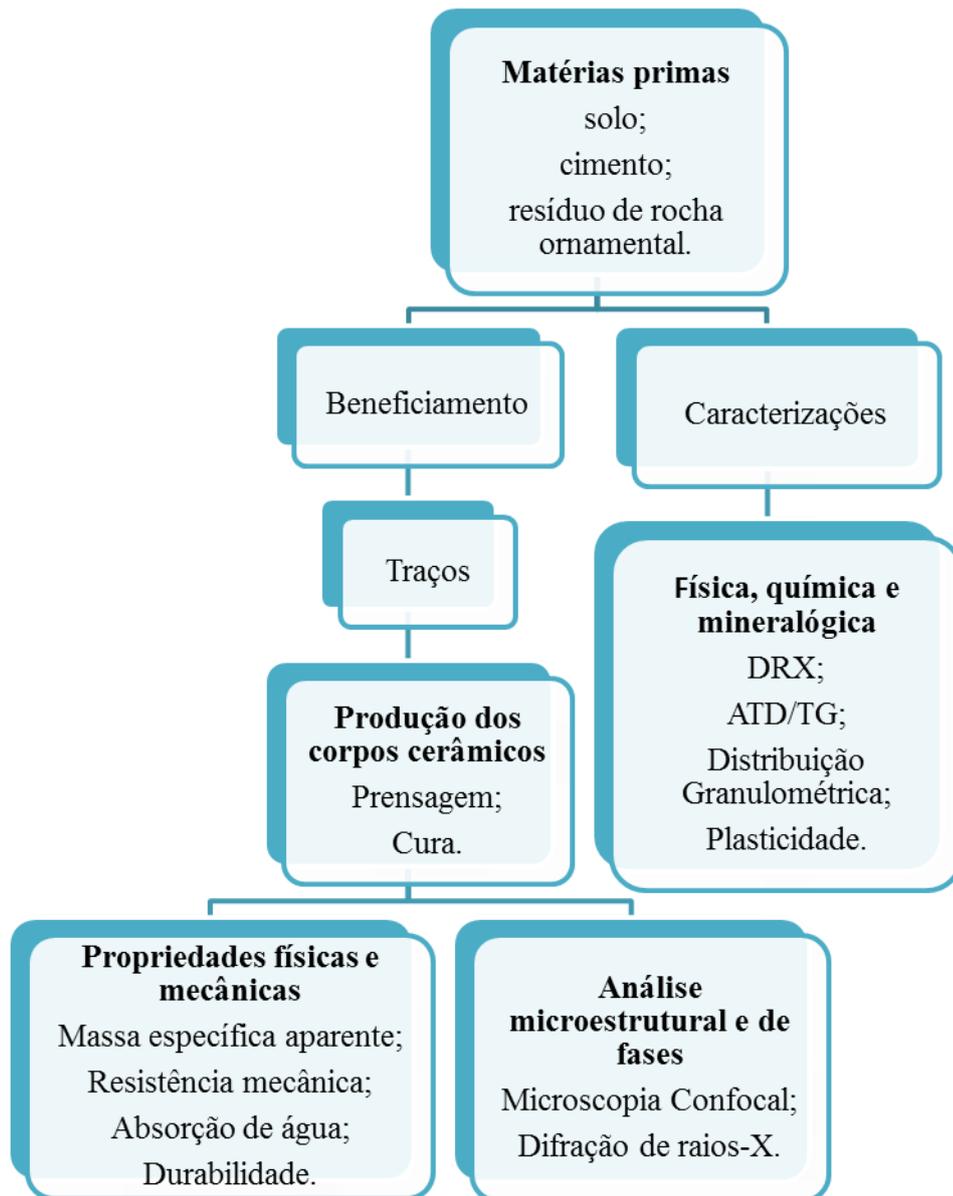


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas envolvidas no procedimento experimental.

3.1. Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas neste trabalho foram: solo arenoso, cimento Portland e resíduo sólido de rocha ornamental. O solo arenoso foi coletado na empresa de Cerâmica Sardinha localizada no município de Campos dos Goytacazes/RJ. O cimento utilizado foi do tipo cimento Portland CP III-40RS, por apresentar grande facilidade de encontrá-lo, seu baixo custo e de ser o cimento que apresenta maior resistência à compressão dentre os recomendados pela Associação Brasileira de Cimento Portland, através do Guia Básico de utilização do Cimento Portland na produção de tijolo solo-cimento (ABCP, 2002). O resíduo sólido de rocha ornamental utilizado foi coletado na empresa de corte de mármore e granitos Marmoreum, localizada no município de Campos dos Goytacazes/RJ. Todos os ensaios realizados neste trabalho foram realizados no laboratório de materiais avançados LAMAV da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

3.2. Metodologia

3.2.1. Beneficiamento das Matérias-Primas

O resíduo sólido de rocha ornamental foi coletado em forma de pó fino. Após coleta, a amostra de resíduo foi depositada em recipiente para secagem em estufa de laboratório a 110 °C durante 24 h. O solo também foi seco em estufa de laboratório a 110 °C durante 24 h. Posteriormente, o solo foi desagregado manualmente com graal e pistilo de porcelana até passagem completa em peneira de 4 mesh (4,75 mm ASTM) (ABCP, 1985). O resíduo foi cominuído em um moinho de bolas Gardelin, e depois desagregado com graal e pistilo até a passagem completa em peneira de 200 mesh (75 µm ASTM). Ao final foi colocado em vasilhame fechado para sua posterior utilização, de modo a não absorver umidade do ar.

3.2.2. Caracterização das Matérias-Primas

As matérias-primas foram submetidas à caracterização mineralógica, física e química, utilizando uma série de técnicas de caracterização como: difração de raios-

X, fluorescência de raios-X, análise térmica diferencial, análise termogravimétrica, análise de tamanho de partículas e plasticidade.

3.2.2.1. Difração de raios-X

A análise mineralógica qualitativa dos minerais presentes, tanto no solo quanto no resíduo de rocha ornamental, foi realizada através de difração de raios-X (DRX). Os experimentos foram realizados em um difratômetro Shimadzu, modelo XRD-7000, utilizando-se radiação monocromática de Cu-K α sob ângulo 2 θ de 5 até 70°, velocidade de 1,5°/min. As fases cristalinas foram identificadas por comparação do ângulo de Bragg e as posições dos picos de Bragg com fichas padrão JCPDS – Joint Comitee of Powder Diffraction Standards. As fichas utilizadas com suas respectivas identificações foram: Caulinita (JCPDS – 29-0306), Quartzo (JCPDS–05-0490), Gibsita (JCPDS–33-0018), Goetita (JCPDS–17-0536), Calcita (JCPDS–29-0306), Belita (JCPDS–32-0149), Etringita (JCPDS–01-0385), Alita (JCPDS–31-0301), Feldspato sódico (JCPDS–10-393), Microclina (JCPDS–19-0926), Hematita (JCPDS–24-0072), Mica (JCPDS–47-0222) e Ilita (JCPDS–25-1157).

3.2.2.2. Composição química

A composição química das matérias-primas foram determinada utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X, de energia dispersiva (EDX), da marca Shimadzu, modelo EDX 700, acoplado a um computador para o processamento de dados. A perda ao fogo das matérias-primas foi determinada de acordo com a expressão (3.1):

$$PF = \frac{M_s - M_c}{M_s} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

PF é a perda ao fogo (%);

M_s é a massa da amostra seca a 110 °C em estufa (g);

M_c é a massa da amostra calcinada a 1000 °C por 2 horas com uma taxa de aquecimento de 10° C/min em forno mufla, marca Maitec, modelo FL 1300.

3.2.2.3. Análises térmicas (ATD/TG)

A análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG) foram realizadas em um analisador simultâneo ATG-ATD, marca Shimadzu, modelo DTG-60H. O ensaio foi realizado sob atmosfera de nitrogênio (28° C) até 1000° C, com uma taxa de aquecimento de 10° C/min durante 30 minutos.

3.2.2.4. Análise granulométrica

Análises granulométricas das matérias-primas foram determinadas através de procedimentos de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984), pelo processo combinado de sedimentação e peneiramento.

3.2.2.5. Plasticidade

As propriedades plásticas (limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade) foram determinadas de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 1984). O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado pela expressão (3.2):

$$IP = LL - LP \quad (3.2)$$

Onde:

IP – índice de plasticidade;

LL – limite de liquidez;

LP – limite de plasticidade.

3.2.3. Preparação dos traços com adição de resíduo sólido de rocha ornamental

Esta etapa consiste na formulação dos traços com incorporação do resíduo sólido de rocha ornamental. Foi utilizada uma mistura de solo-cimento padrão, sendo 1: 8, ou seja, uma parte de cimento para oito partes de solo (Funtac, 1999). A massa foi umedecida com o teor de 16% de água. Para a mistura de referência de solo-cimento foi adicionado o resíduo de rocha ornamental em substituição parcial do

solo, nas porcentagens de 10, 20, 30 e 40 % em peso. As Tabelas 3.1 e 3.2 mostram as composições em gramas (g) e em partes de cada componente, respectivamente, das composições com adição de resíduo de rocha ornamental.

Tabela 3.1 – Composição dos traços para as misturas de solo-cimento para os corpos (em g).

Traço	Composição da porção solo + resíduo de rocha	Solo (g)	Resíduo (g)	Cimento (g)	Água (g)
TR	0 % de resíduo de rocha	89,0	00,0	11	16
T1	10 % de resíduo de rocha	80,1	08,9	11	16
T2	20 % de resíduo de rocha	71,2	17,8	11	16
T1	30 % de resíduo de rocha	62,3	26,7	11	16
T4	40 % de resíduo de rocha	53,4	35,6	11	16

Tabela 3.2 – Composição dos traços para as misturas de solo-cimento para os corpos de prova unitário (em partes).

Traço	Composição da porção solo + resíduo de rocha	Solo	Resíduo	Cimento
TR	0 % de resíduo de rocha	8,0	0,0	1,0
T1	10 % de resíduo de rocha	7,1	0,9	1,0
T2	20 % de resíduo de rocha	6,2	1,8	1,0
T1	30 % de resíduo de rocha	5,3	2,7	1,0
T4	40 % de resíduo de rocha	4,4	3,6	1,0

3.2.4. Preparação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram conformados por prensagem uniaxial em prensa hidráulica, com capacidade de 15 toneladas, marca Metalpem, modelo PHP (Figura 3.2). A carga utilizada no trabalho para os traços foi de 2 toneladas e umidade de 16 %. A matriz utilizada é de forma cilíndrica ($\varnothing = 37,17$ mm) e os pistões são de aço.



Figura 3.2. Prensa hidráulica utilizada na confecção dos corpos cimentícios (Rodrigues, 2012).

3.2.5. Etapa de cura dos corpos-de-prova

Após a prensagem, os corpos-de-prova foram depositados em uma câmara úmida. Na câmara úmida (Figura 3.3), os corpos-de-prova foram curados sob condições de 95 % de umidade, temperatura de 23 ± 2 °C e cura por um período de 28 dias para realização dos ensaios tecnológicos. Estas condições são consideradas apropriadas de acordo com a norma NBR 12024 (ABNT, 1992).

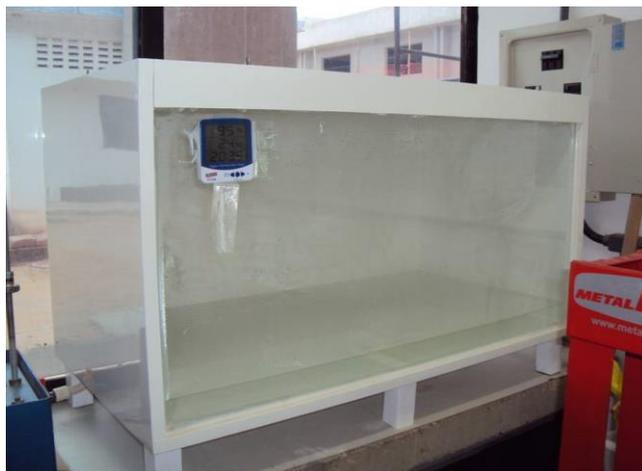


Figura 3.3. – Câmara úmida utilizada durante a cura dos corpos-de-prova (Rodrigues, 2012).

3.2.6. Caracterização física e mecânica dos corpos-de-prova

3.2.6.1. Massa específica Bulk

A massa específica Bulk (ρ_b) dos corpos-de-prova foi determinada de acordo com a seguinte expressão (3.3):

$$\rho_b = \frac{M}{V} \quad (3.3)$$

Onde:

ρ_b – massa específica Bulk, em g/cm³;

M– massa, em gramas, dos corpos cerâmicos;

V– volume, em cm³, dos corpos cerâmicos.

3.2.6.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada após 28 dias de cura, segundo a norma NBR 10836 (ABNT, 1994). O ensaio de compressão foi realizado com o auxílio de uma máquina de ensaios universal, marca Instron, modelo 5582 com velocidade de carregamento de 1 mm/min (Figura 3.4). Foram analisados 7 corpos de prova de cada traço neste ensaio.



Figura 3.4 – Máquina utilizada no ensaio de compressão simples.

A resistência à compressão dos corpos cerâmicos foi obtida a partir da expressão (3.4):

$$T = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

Onde:

T – Tensão de ruptura à compressão simples, em MPa;

F – carga de ruptura, em N;

A – área das peças curadas, em mm²;

3.2.6.3. Absorção de água

A absorção de água foi determinada de acordo com a norma NBR 10836 (ABNT, 1994). O valor de absorção de água é obtido por meio da expressão (3.5):

$$AA(\%) = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Onde:

AA – absorção de água, em %;

M_u – massa do corpo cerâmico saturado em água, em gramas;

M_s – massa do corpo cerâmico seco, em gramas.

3.2.6.4. Durabilidade

O ensaio de durabilidade foi realizado de acordo com a NBR 13554 (ABNT, 1996). Esta norma prescreve o método para a determinação de perda de massa, variação de umidade e variação de volume produzido por ciclos de molhagem e secagem de corpos-de-prova de solo-cimento.

Foram preparados três corpos de prova de cada massa cimentícia, denominados como corpo-de-prova n° 1 (CP1), corpo-de-prova n° 2 (CP2) e corpo-de-prova n° 3 (CP3). O CP1 foi usado para obter a variação de volume e de umidade. Os corpos-de-prova CP2 e CP3 foram usados para obter a perda de massa durante o ensaio. Imediatamente após a desmoldagem, todos os corpos de

prova foram pesados e, nos CP1 também foram determinados o volume inicial (V_i). Os corpos-de-prova foram então curados à temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar não inferior a 95 %. Após a cura, o CP1 foi pesado e determinado seu volume e em seguida, todos os corpos-de-prova foram submetidos a seis ciclos de molhagem e secagem, seguindo os seguintes passos:

- 1) Imersão em água de todos os três corpos-de-prova e removendo-os após 5 horas;
- 2) Com um pano úmido, tirar o excesso da água superficial do CP1 e determinar sua massa e seu volume;
- 3) Colocar os três corpos-de-prova na estufa de temperatura de 71 ± 2 °C por 42 horas e então retirá-los;
- 4) Calcular a massa e o volume do CP1;
- 5) Escovar a superfície de cada um dos corpos-de-prova CP2 e CP3, aplicando a escovação em todo o comprimento do corpo-de-prova com uma escovação firme correspondente a 15 N. Após a retirada da estufa, o resfriamento e a escovação devem ser feitos em um período de 1 hora.

Após completar todos os ciclos, todos os corpos-de-prova foram levados à estufa de temperatura entre 105 °C e 110 °C, adquirindo massa constante.

Com os dados coletados durante todo o processo, foi possível calcular a variação de umidade e a variação de volume do CP1 e a perda de massa dos CP2 e CP3 após os seis ciclos.

3.2.7. Caracterização microestrutural e de fases dos corpos-de-prova

A microestrutura dos corpos-de-prova incorporados com resíduo foi realizada após cura de 28 dias através de microscopia Confocal. Foi utilizado um microscópio a laser de medição 3D, modelo LEXT OLS 4000, de fabricação Olympus. Foi feita a análise da superfície de fratura das peças cerâmicas.

A análise de fases dos corpos cerâmicos incorporados foi feita por difração de raios-X. Foram determinadas as fases cristalinas remanescentes e as novas fases formadas durante o processo de cura. A análise de difração de raios-X (DRX) foi realizada em um difratômetro Shimadzu, XRD-7000, utilizando radiação monocromática de Cu- K_α sob ângulo 2θ de 5 até 70°, a uma velocidade de 1,5° por minuto.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização das Matérias-Primas Utilizadas

4.1.1. Análise mineralógica

A Figura 4.1 apresenta o difratograma de raios-X do resíduo de rocha ornamental utilizado nesse trabalho. Nota-se que o resíduo de rocha é constituído principalmente de quartzo (SiO_2), mica muscovita [$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$], feldspato potássico (KAlSi_3O_8 , microclina), hematita (Fe_2O_3) e calcita (CaCO_3). A grande predominância de quartzo e de muscovita, minerais presentes nos granitos, demonstra que no resíduo de rocha ornamental houve predominância desse tipo rocha (Miranda, 2007). A hematita e calcita estão relacionadas principalmente à adição de granalha e óxido de cálcio como abrasivo e lubrificante no processo de corte/serragem de rochas ornamentais. Este resultado está de acordo com os dados encontrados na composição química do resíduo de rocha (Tabela 4.2).

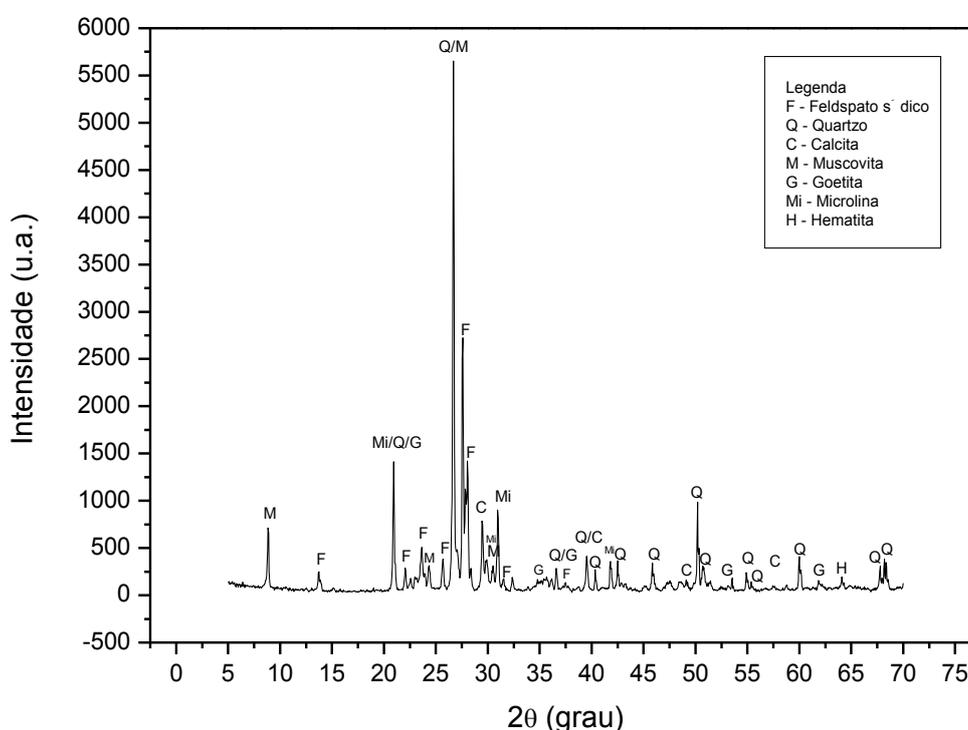


Figura 4.1. – Difratograma de raios-X do resíduo de rocha ornamental: Q - Quartzo; M – Muscovita; F – Feldspato sódico; G – Goetita; C – Calcita; MI – Microclina e H – Hematita.

Na Figura 4.2 é apresentado o difratograma de raios-X do solo arenoso. Podem-se observar picos que são característicos das seguintes fases cristalinas: quartzo, feldspato, goetita, microclina, mica muscovita e caulinita. Como esperado, a sílica livre (SiO_2) é a fase mineralógica principal do solo, ou seja, o solo é rico na fração areia. Isso significa que em termos mineralógicos o solo arenoso e o resíduo são bastante parecidos, justificando a proposta deste trabalho em substituir partes do solo arenoso por resíduo de rocha ornamental. É importante ressaltar que, para a mistura de solo-cimento, a grande quantidade de quartzo no solo arenoso é altamente desejável, pois o quartzo diminui a plasticidade do solo arenoso e atua como material não plástico.

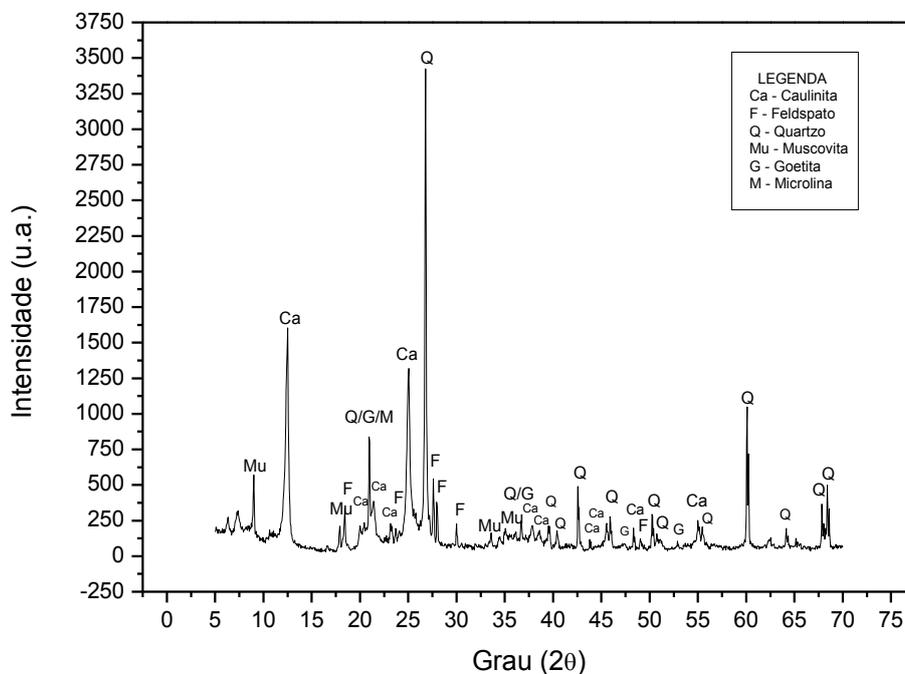


Figura 4.2 – Difratograma de raios-X do solo arenoso: Ca - Caulinita; G - Goetita; F – Feldspato sódico; Q – Quartzo; Mu – Muscovita e M – Microclina.

O difratograma de raios-X do cimento Portland CPIII-40RS é apresentado na Figura 4.3. Foram identificadas as seguintes fases mineralógicas: silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) também conhecido como alita, silicato bicálcio ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) chamado de belita, ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) e sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), comumente chamado de gesso.

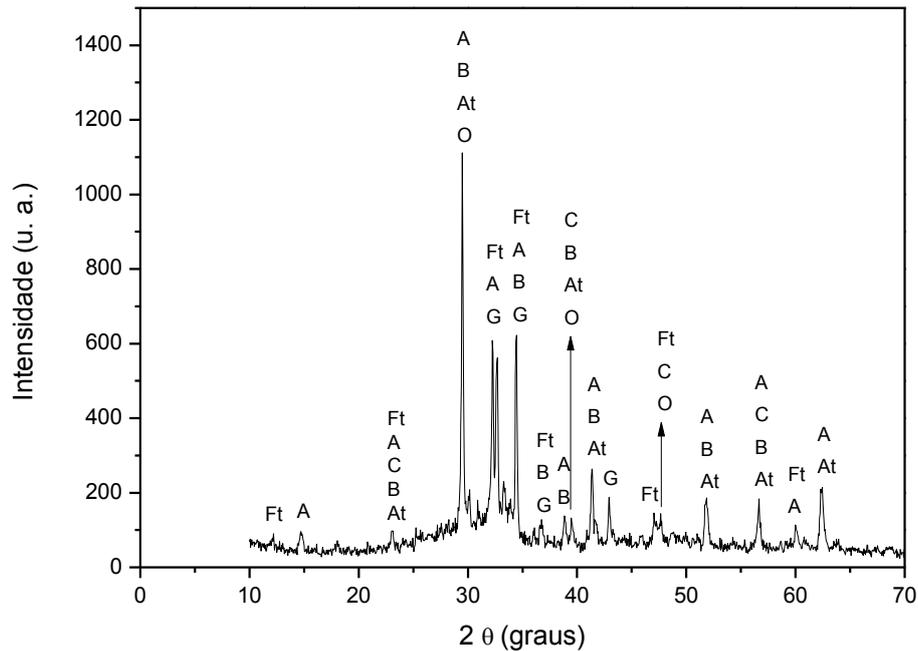


Figura 4.3 – Difratoograma de raios-X do cimento Portland CEM III-40RS: Ft = Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF); A = Alita (C_2S); C = Carbonato de cálcio; B = Belita (C_2S); At = Aluminato tricálcio (C_3A); O = Óxido de cálcio; G = Gibsita ($CaSO_4$).

Além dessas fases, foi identificada a presença de CaO, que pode estar relacionado à composição da escória de alto forno do cimento estudado (Tabela 4.1) e ao calcário ($CaCO_3$), uma das matérias-primas do cimento Portland.

Tabela 4.1 – Composição química da escória de alto forno do cimento Portland CEM III-40RS (Pinto, 2010).

Óxidos	Teor (%)
CaO	41,60
SiO ₂	33,65
Al ₂ O ₃	12,42
MgO	7,95
TiO	0,73
FeO	0,45

4.1.2. Análise química

A composição química e a perda ao fogo das matérias-primas utilizadas neste trabalho, são apresentadas na Tabela 4.2. Pode-se observar que o resíduo de rocha ornamental é constituído principalmente por SiO_2 . O solo arenoso também apresenta predominância de sílica. O cimento Portland CP III - 40RS apresenta alto teor de óxido de cálcio (CaO). Comparando a composição química com a difração de raios-X (Figuras. 4.1 - 4.3), percebemos que os resultados estão se revalidando, sustentando a existência desses compostos.

Analisando a composição química do resíduo de rocha ornamental, verifica-se que a amostra do resíduo é rica em sílica com cerca de 61,50 %. O resíduo de rocha ornamental também possui um teor considerável de alumina (15,33 %) e óxido de cálcio (11,58 %). O óxido de cálcio (CaO) com um percentual de 11,58 % e o óxido de ferro (Fe_2O_3) com 2,59 % presentes no resíduo são derivados, respectivamente, da cal utilizada como lubrificante e da granalha de aço utilizada na etapa de desdobramento dos blocos em chapas. A perda ao fogo é da ordem de 4,40 %, considerada baixa e dentro da faixa para rochas ornamentais.

De acordo com os dados da Tabela 4.2, a composição química do solo é de SiO_2 (50,39 %), Al_2O_3 (31,81%) e Fe_2O_3 (9,23 %). Como esperado, o solo arenoso utilizado é rico em sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) com cerca de 82 %. A cor avermelhada do solo deve-se à presença de óxido de ferro Fe_2O_3 . A perda ao fogo é relativamente baixa e está relacionada à alta quantidade de sílica livre no solo. A perda ao fogo do solo é da ordem de 9,00 %, a qual pode estar relacionada à presença de argilominerais, hidróxidos e matéria orgânica (caulinita).

O principal composto do cimento Portland CP III – 40RS é CaO , apresentando um teor de 65,15 % em peso. Outros óxidos como Al_2O_3 e SiO_2 , também se destacam com teores de 7,11 % e 18,87 %, respectivamente. O CaO está relacionado ao calcário, um dos constituintes do cimento Portland e pode ser proveniente da composição da escória de alto forno do cimento analisado. Já o Al_2O_3 e SiO_2 encontram-se na argila que, juntamente com o calcário, após queima, formará o clínquer (Figura 2.8). Observa-se que a perda ao fogo é baixa, em torno de 2,50 %.

Tabela 4.2 – Composição química do resíduo de rocha ornamental, solo arenoso e Cimento Portland CPIII-40RS (% em peso).

<i>Composição</i>	<i>Resíduo de Rocha Ornamental</i>	<i>Solo arenoso</i>	<i>Cimento Portland CPIII- 40RS</i>
CaO	11,58	0,76	65,15
SiO ₂	61,50	50,39	18,87
Fe ₂ O ₃	2,59	9,23	1,21
Al ₂ O ₃	15,33	31,81	7,11
K ₂ O	6,69	3,65	0,56
SO ₃	1,69	1,83	3,71
TiO ₂	0,51	2,02	0,53
V ₂ O ₅	-	0,06	-
ZrO ₂	0,03	0,18	-
SrO	0,02	0,02	0,06
Rb ₂ O	0,01	0,01	-
Y ₂ O ₃	-	0,01	-
MnO	0,06	-	0,30
Perda ao Fogo (1000 °C)	4,40	9,00	2,50

4.1.4. Análise granulométrica

A Figura 4.4 apresenta a curva de distribuição de tamanho das partículas do resíduo de rocha ornamental. Observa-se que a amostra do resíduo contém 7,8 % de fração areia ($60 \mu\text{m} \leq x < 600 \mu\text{m}$), 91,1 % de fração silte ($2 \mu\text{m} \leq x < 60 \mu\text{m}$) e 1,1 % de fração argila ($< 2 \mu\text{m}$). O alto percentual das frações silte e areia (98,9 %) que, apresentam uma granulometria mais grosseira, são ricas em feldspatos e areia. Percebe-se que o resíduo possui 92,2 % de partículas menores que 0,075 mm. Trata-se de um material pulverulento, podendo atuar como filer, preenchendo os espaços vazios (Miranda, 2007).

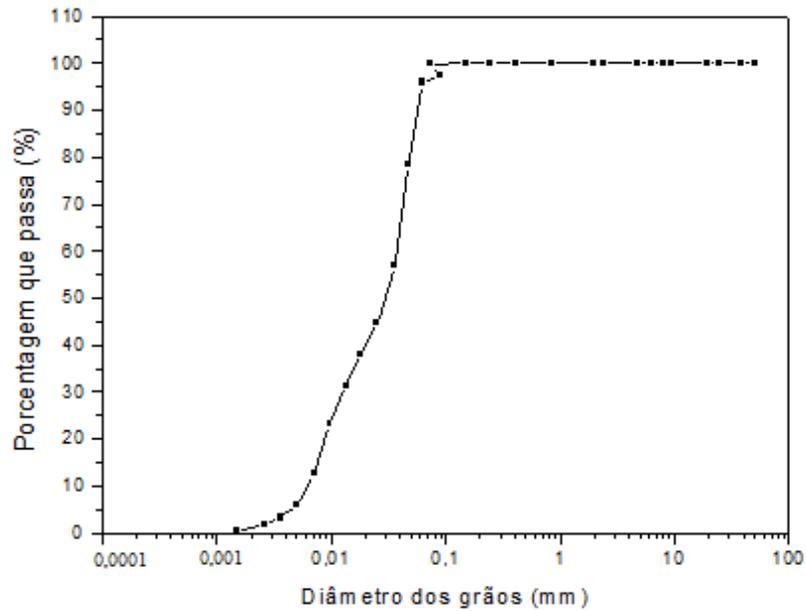


Figura 4.4– Distribuição de tamanho de partícula do resíduo de rocha ornamental.

A curva de distribuição de tamanho de partícula do solo é apresentada na Figura 4.5. Observa-se que o solo apresenta um percentual de 26 % de partículas de granulometria abaixo de 2 μm , que corresponde à fração argila. A fração de silte ($2 \mu\text{m} \leq x < 60 \mu\text{m}$) é de 35 % e a fração de areia ($60 \mu\text{m} \leq \varphi < 600 \mu\text{m}$) é de 39 %.

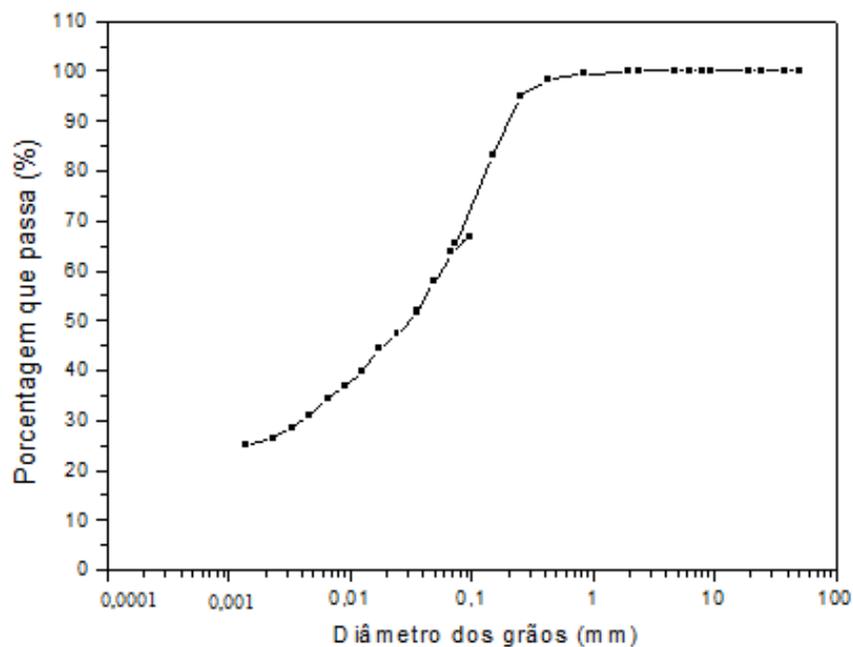


Figura 4.5 – Distribuição de tamanho de partícula do solo arenoso.

Nota-se que o solo arenoso utilizado apresenta um grande percentual de partículas grosseiras, particularmente de partículas de quartzo. Isto é muito

importante na preparação da mistura solo-cimento. De acordo com Segantini (2000), a presença de areia na composição do solo, a qual atua como material inerte e com função apenas de enchimento, permitirá a liberação de maior quantidade de cimento para aglomerar os grãos menores.

Verifica-se que o solo e o resíduo de rocha ornamental estudados apresentam diferenças do ponto de vista granulométrico. Dessa forma, a substituição de partes do solo por resíduo de rocha ornamental produzirá uma massa arenosa com composição granulométrica mais próxima daquela recomendada pela ABCP (2002), para produção de tijolo solo-cimento: fração argila: 10 a 20 %; fração silte: 10 a 20 %; e fração areia: 50 a 70 %.

4.1.5. Plasticidade

A Tabela 4.3 apresenta os valores dos limites de consistência de Atterberg do solo arenoso. O solo arenoso estudado apresentou índice de plasticidade da ordem de 24,5 %, o qual pode ser classificado como um material com grande plasticidade. Isto significa que o solo arenoso usado apresenta plasticidade acima daquele recomendado, que é de um solo de baixa plasticidade. Os solos indicados para fabricação de tijolo solo-cimento são os solos arenosos porque se estabilizam com menores quantidades de cimento.

Tabela 4.3 – Limites de consistência de Atterberg do solo arenoso (%).

<i>Limite de Liquidez</i>	<i>Limite de Plasticidade</i>	<i>Índice de Plasticidade</i>
54,6	30,1	24,5

Os limites de consistência são as variáveis que melhor expressam as condições de trabalhabilidade dos solos. O limite de plasticidade (LP) está relacionado à quantidade de água mínima necessária para que o estado de consistência plástico seja adquirido. O limite de liquidez (LL) está relacionado à quantidade de água em que o material apresenta uma consistência de lama, ultrapassando assim, a faixa de consistência plástica. Valores elevados podem conduzir a maiores dificuldades no destorroamento e também no processo de mistura dos componentes.

Quanto menor o índice de plasticidade do solo, maior facilidade terá para estabilizá-lo, uma vez que o material estará menos sujeito às variações dimensionais, resultantes do inchamento do solo. Verifica-se que os valores de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) estão acima daqueles recomendados pela ABCP (LL \leq 45 % e LP \leq 18 %) para produção de tijolo solo-cimento. É importante ressaltar também que os teores de materiais plásticos e não plásticos estão relacionados diretamente com a plasticidade, podendo influenciar nos fatores tecnológicos como conformação, resistência mecânica e ainda no comportamento de hidratação do cimento.

A Tabela 4.4 mostra os valores dos limites de consistência de Atterberg das massas cimentíceas. Verifica-se que o resíduo apresenta um efeito desplastificante no solo. Quanto maior a quantidade de resíduo adicionada, menor é o limite de plasticidade e índice de plasticidade das massas cerâmicas. De fato, os experimentos mostraram que o resíduo de rocha ornamental estudado é um material não plástico. Além do mais, as massas cimentíceas apresentaram valores de limite de liquidez e limite de plasticidade mais próximos dos recomendados pela ABCP.

Tabela 4.4 – Limites de consistência de Atterberg das massas cimentíceas (%).

<i>Massas cimentíceas</i>	<i>Limite de Liquidez</i>	<i>Limite de Plasticidade</i>	<i>Índice de Plasticidade</i>
10 % de resíduo	52,4	28,5	23,9
20 % de resíduo	51,7	27,7	24
30 % de resíduo	47,1	26,9	20,2
40 % de resíduo	47,3	25,6	21,7

4.1.6. Análise térmica

O comportamento térmico do solo arenoso e do resíduo de rocha ornamental foi analisado por meio dos ensaios de análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG).

A Figura 4.6 apresenta as curvas de ATD e ATG do solo arenoso. De acordo com a curva de ATD, a amostra do solo apresenta três vales endotérmicos nas temperaturas de 115 °C, 322 °C e 590 °C, respectivamente. O pico endotérmico em torno de 115 °C possui perda de massa que está associado à perda água fisicamente adsorvida da caulinita. O pico endotérmico na temperatura de 322 °C

apresenta perda de massa de 1,5 % que deve estar associado à desidratação hidróxidos e decomposição de matéria orgânica. Nota-se outro pico endotérmico em torno de 590 °C, com perda de massa de 6,5 % que está relacionado à perda de água de constituição de argilominerais, sobretudo a caulinita que se torna amorfa. Percebe-se um pico exotérmico a 952 °C, que pode estar relacionado com a quebra de estrutura da metacaulinita formando o espinélio, como a reação mostrada a seguir:

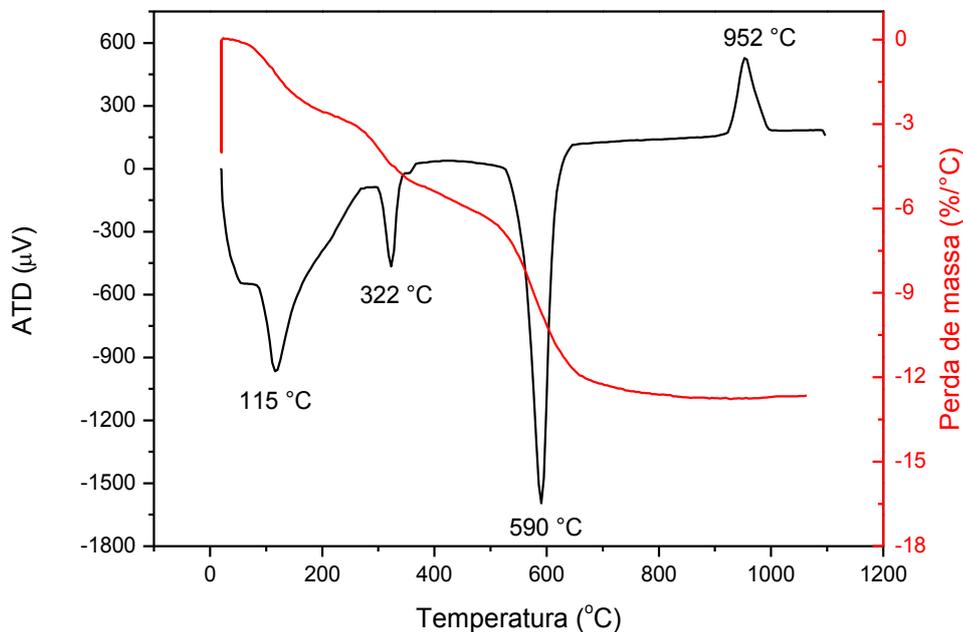
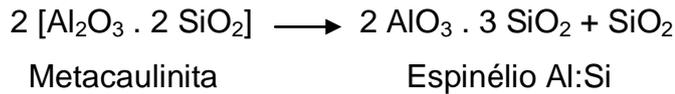


Figura 4.6 –Curva de ATD/TG do solo arenoso.

A Figura 4.7 apresenta a curva ATD do resíduo de rocha ornamental. Essa análise complementa a caracterização mineralógica por DRX do resíduo e permite conhecer o comportamento térmico do mesmo. A primeira etapa da curva deve-se à perda de água livre em aproximadamente 48,5 °C. Em torno de 582 °C nota-se um pico endotérmico associado à transformação alotrópica do quartzo- α para o quartzo- β . Pode-se notar a 818 °C um pico endotérmico que pode ser atribuído à decomposição de carbonatos. Entre 600 a 900 °C, a perda de massa pode ser atribuída à eliminação de água de constituição de mineral micáceo.

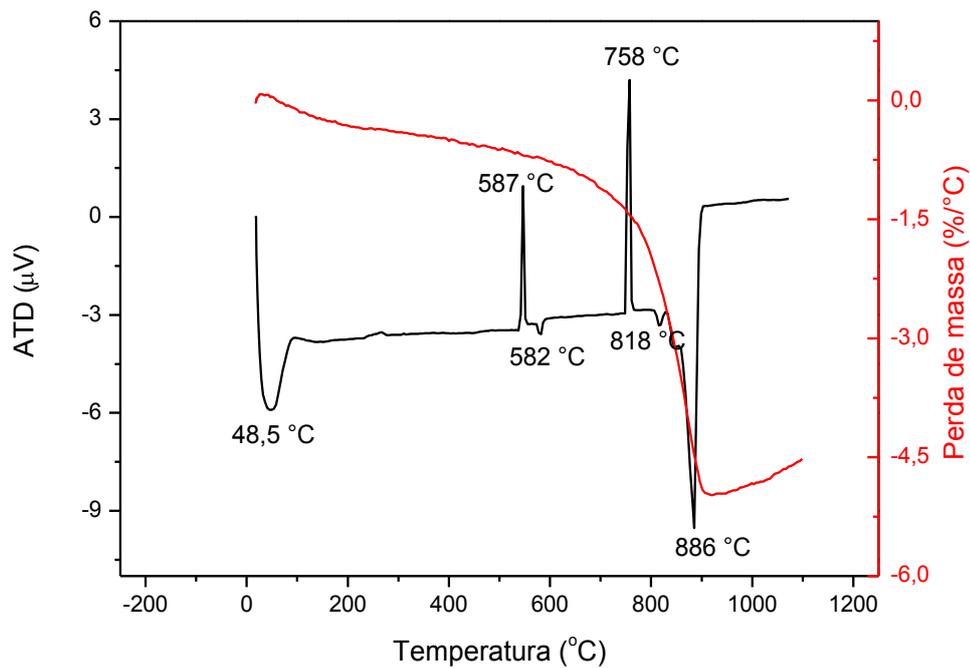


Figura 4.7 –Curva de ATD/TG do resíduo de rocha ornamental.

4.2. Efeitos do resíduo de rochas ornamentais nas propriedades tecnológicas de solo-cimento

4.2.1. Avaliação das propriedades tecnológicas dos corpos cimentícios curados

As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam as propriedades tecnológicas: massa específica bulk, resistência à compressão e absorção de água respectivamente, dos corpos cimentícios curados aos 28 dias.

A Figura 4.8 apresenta o efeito da adição do resíduo de rocha ornamental na massa específica bulk dos corpos cimentícios. Percebe-se que, os corpos de prova com adição de resíduo apresentam massa específica Bulk superior ao corpo cimentício sem adição de resíduo. Isto se deve ao fato do resíduo contribuir para um maior grau de empacotamento das massas estudadas, diminuindo a densificação das peças.

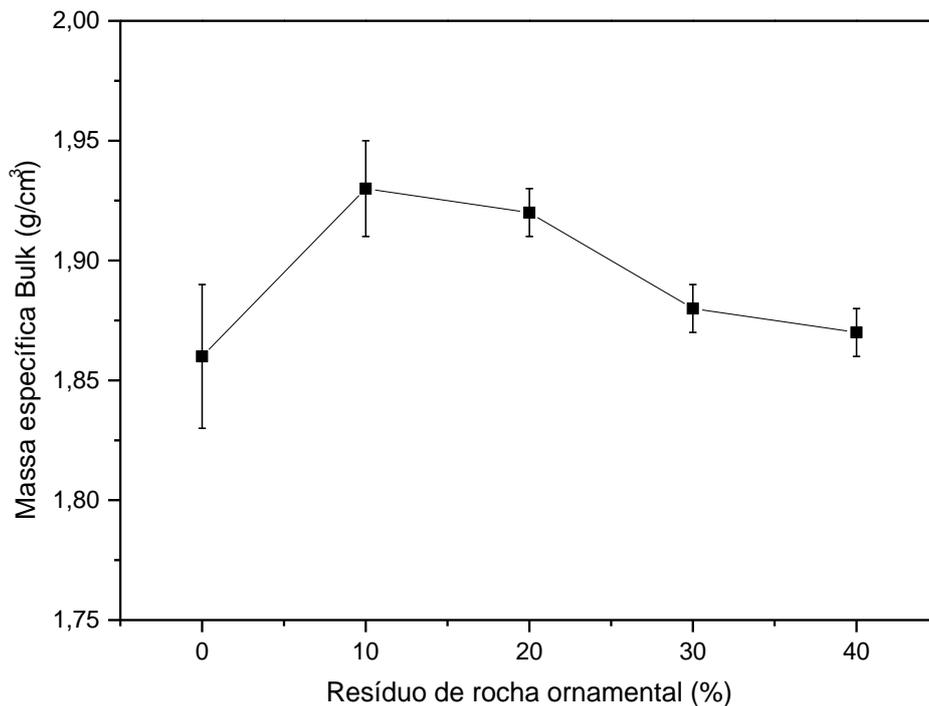


Figura 4.8 – Massa específica bulk dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de rocha ornamental após 28 dias de cura.

Um dos parâmetros mais importantes do solo-cimento é a resistência à compressão simples, pois ela está diretamente relacionada com o desempenho das paredes de uma edificação. A NBR 10834 (ABNT, 1994) determina que a resistência média dos tijolos de solo-cimento deve ser igual ou superior a 2,0 MPa aos 28 dias, mas que os valores individuais não podem ser inferiores a 1,7 MPa.

A Figura 4.9 apresenta os dados de resistência à compressão simples dos corpos cimentícios. Observa-se que todos os corpos cimentícios que, passaram por um período de cura de 28 dias, apresentaram valores de resistência à compressão simples acima do valor especificado na norma NBR 10834. Verifica-se que com a substituição de até 30 % do solo por resíduo, a resistência à compressão praticamente não é alterada. Percebe-se um valor muito elevado da resistência à compressão para os corpos cimentícios incorporados com 40 % de resíduo. Isto pode estar relacionado ao fato de que as massas contendo maior quantidade de resíduo apresentam maior compactabilidade.

Segundo (Metha e Monteiro, 1994) aput (Gonçalves, 2000), quando é incorporado adições minerais em concretos, forma-se uma maior quantidade de

silicato de cálcio hidratado e isso pode levar a uma redução da porosidade da matriz. Verifica-se na Figura 4.25 que, com a introdução de 40 % de resíduo, houve um aumento na intensidade do pico de silicato de cálcio presente no corpo cimentício e a Figura 4.20 mostra uma considerável redução dos poros no traço com 40 % de resíduo. Esses fatos podem justificar o aumento da resistência à compressão desse traço.

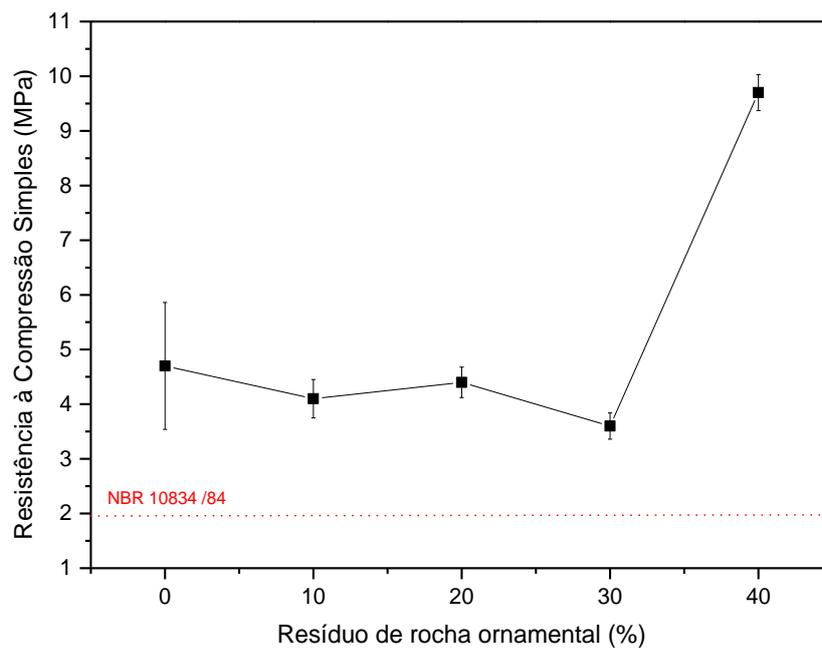


Figura 4.9 – Resistência à compressão dos corpos cimentícios com 28 dias de cura.

A Figura 4.10 apresenta os valores de absorção de água para os corpos cimentícios. Os resultados mostram que a substituição parcial do solo arenoso com 10 %, 20 %, 30 % e 40 % em peso de resíduo de rocha ornamental teve pouca influência na absorção de água. A variação observada está dentro dos limites de dispersão. Verifica-se ainda que todos os corpos cimentício apresentaram valores individuais de absorção de água inferiores a 22 % e estão de acordo com a NBR 10834 (ABNT, 1994). A incorporação de 40 % de resíduo diminuiu significativamente o valor de absorção de água porque o resíduo atuou como um filler, ou seja, reduzindo a porosidade aberta. Os traços com incorporação de 30 % e 40 % apresentaram uma relação proporcional entre ganho de resistência e diminuição de absorção de água.

Observa-se que, em termos de absorção de água, pode-se incorporar 10 %, 20 %, 30 % e 40 % de resíduo de rocha para a confecção de tijolos solo-cimento.

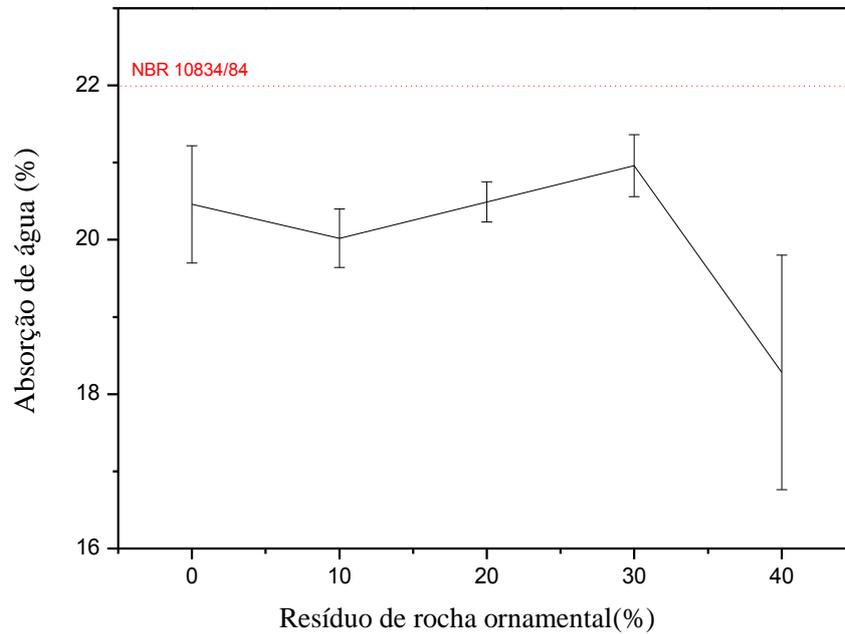


Figura 4.10 – Absorção de água dos corpos cimentícios incorporados com resíduo de rocha ornamental após 28 dias de cura.

4.2.1.1. Retração Linear

A Figura 4.11 apresenta a retração linear correspondente à altura dos corpos-de-prova. Observa-se que a retração linear é maior com a incorporação de 20 % de resíduo de rocha ornamental. Acima dessa porcentagem a retração linear volta a diminuir. A diminuição da retração linear pode estar relacionada à presença de sílica livre presentes no solo das composições.

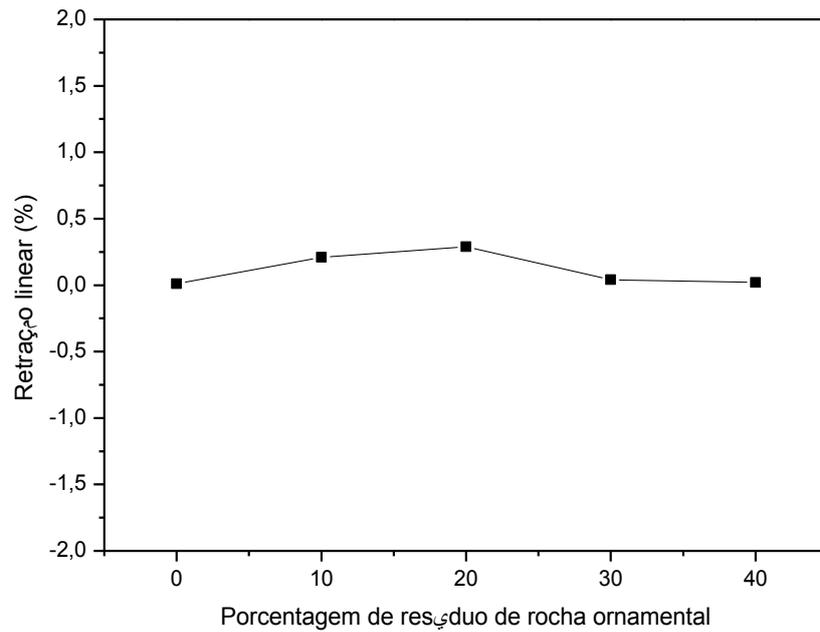


Figura 4.11 – Retração linear dos corpos cimentícios.

A Figura 4.12 apresenta a retração em volume dos corpos cimentícios. Observa-se que a retração volumétrica dos corpos cimentício é muito baixa, principalmente os corpos de prova com incorporação de 30 e 40 % de resíduo.

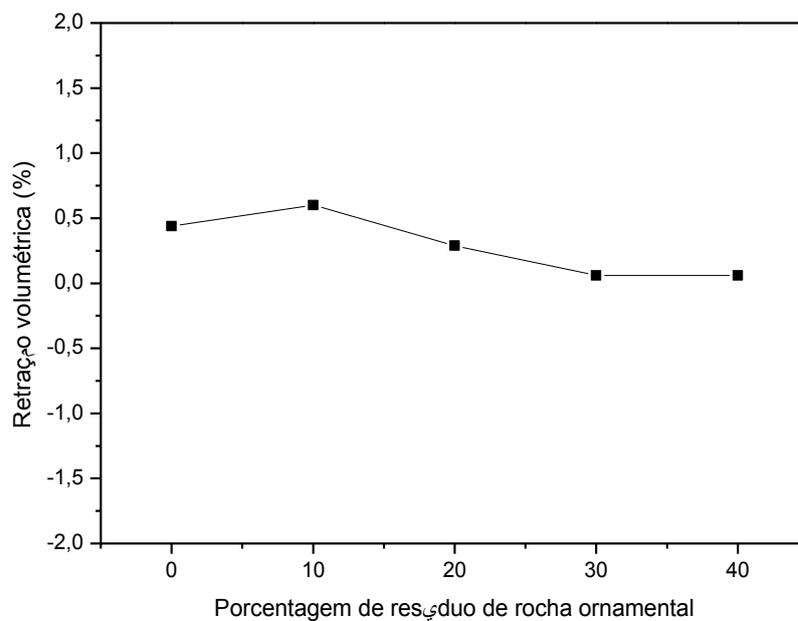


Figura 4.12 – Retração volumétrica dos corpos cimentícios.

A Figura 4.13 apresenta os corpos cimentícios produzidos com 0, 10, 20, 30 e 40 % de resíduo após cura de 28 dias.



Figura 4.13 – Corpos-de-prova incorporados com 0, 10, 20, 30 e 40 % de resíduo, respectivamente.

4.2.1.2. Durabilidade dos corpos cimentícios

Os resultados de durabilidade dos corpos cimentícios são apresentados na Tabela 4.5. Os valores de perda de massa dos corpos-de-prova submetidos à escovação foram determinados segundo a NBR 13554 (ABNT, 1996). Todos os corpos cimentícios apresentaram perda de massa mínima, entre 0,20 % para o traço T2 (com incorporação de 20 % de resíduo) e 0,60 % para o traço T4 com adição de 40 % de resíduo (Figura 4.14). De acordo com a ABNT(1996), depois que os tijolos de solo-cimento forem submetidos aos ciclos de imersão e secagem, sua perda de massa não deve ser superior a 10 %.

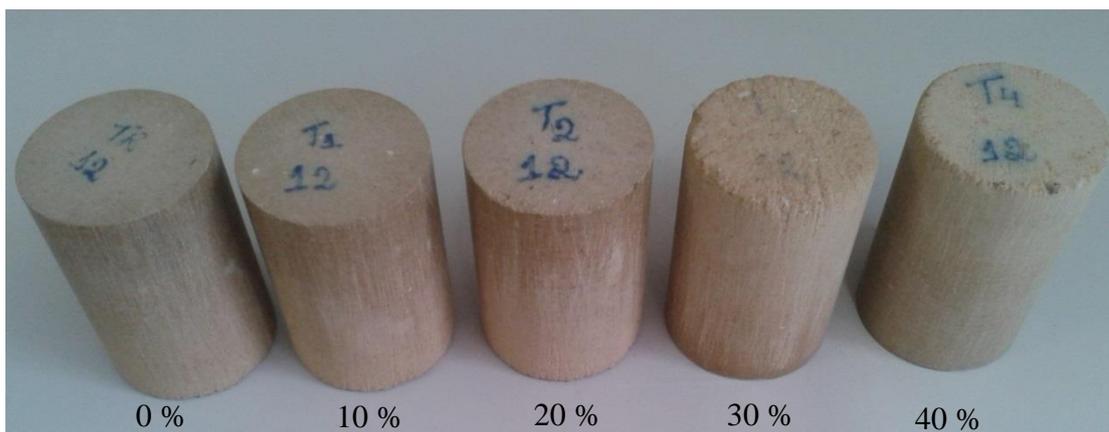


Figura 4.14 – Corpos cimentícios após ensaio de durabilidade.

Analisando a Tabela 4.5, percebe-se que todos os corpos de prova apresentaram perda de massa ao longo da realização dos seis ciclos e com valores dentro das normas estabelecidas.

Tabela 4.5 – Perda de massa final dos corpos cimentícios após o sexto ciclo do ensaio de durabilidade.

<i>Composição</i>	<i>Perda de massa total (%)</i>
TR	0,25
T1	0,40
T2	0,20
T3	0,45
T4	0,60
NBR 13554	10,00

Percebe-se na Figura 4.15, que a resistência à compressão dos corpos-de-prova que foram submetidos aos ciclos de imersão e secagem é maior que os corpos de prova que não passaram por esse ensaio. O mesmo resultado foi observado por Grande (2003), ao adicionar sílica na mistura de solo-cimento e, Carneiro et. al. (2001) ao utilizar agregado reciclado. Tanto o agregado como a sílica, apresentam características pozolânicas que melhora e modifica o processo de hidratação dos tijolos compostos por esse tipo de adição, aumentando a resistência mecânica dos tijolos, relata Carneiro et. al. (2001).

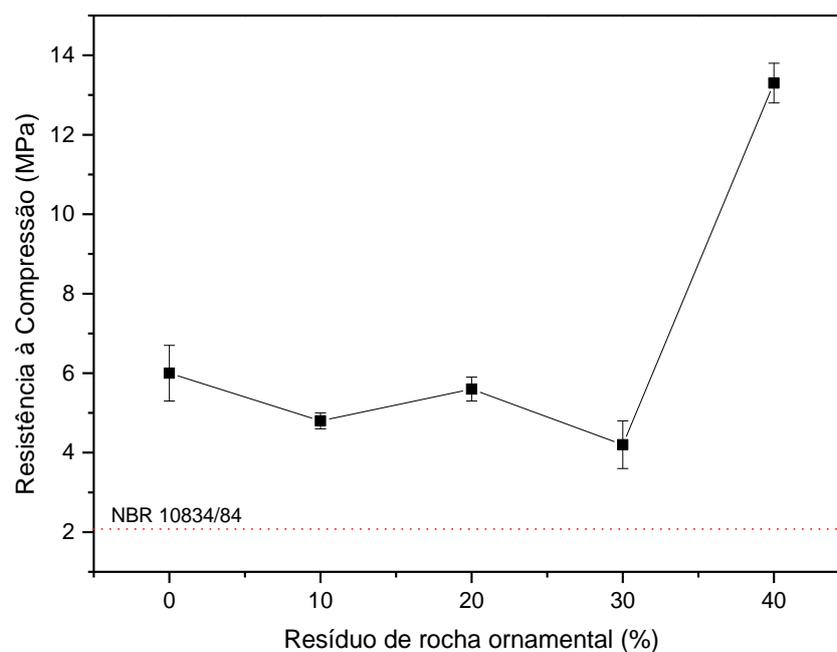


Figura 4.15 – Resistência à Compressão dos corpos cimentícios após ensaio de durabilidade.

A Tabela 4.6 apresenta a variação da resistência à compressão dos corpos de prova normais e os corpos de prova envelhecidos, que passaram pelo ensaio de durabilidade. Observa-se que todas as amostras apresentaram aumento em sua resistência. As amostras com incorporação de 40 % de resíduo que passaram por processo de desgaste apresentou aumento em sua resistência igual a 37 %, indicando que as amostras não sofreram degradação do sistema. O mesmo resultado para a amostra de 40 % foi encontrado por Lima et. al. (2010).

Tabela 4.6 – Resultados de Resistência à compressão simples (MPa).

<i>Teor de Resíduo</i>	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %
Normal	4,7	4,1	4,4	3,6	9,7
Envelhecido	6,0	4,8	5,6	4,2	13,3
Varição (Δ_{RCS})	28 %	17 %	27 %	17 %	37 %

Analisando os resultados do ensaio de durabilidade, pode-se afirmar que todos os traços podem ser utilizados para a confecção de tijolos do tipo solo-cimento porque esses não sofreram envelhecimento. Esses resultados estão de acordo com os demais ensaios físicos e mecânicos, comprovando que a massa cimentícia elaborada neste trabalho, pode ser utilizada na fabricação de tijolo solo-cimento, resultando em tijolos de alta qualidade.

4.3. Análise microestrutural e de fases dos corpos cimentícios

4.3.1. Análise microestrutural

A análise microestrutural dos corpos cimentícios estudados contribui para o maior entendimento do comportamento das suas propriedades em função da adição de resíduo de rocha ornamental e da hidratação do cimento.

A Figura 4.16 apresenta as micrografias obtidas por microscopia confocal, com aumento de 108 x, 216 x e 430 x, da superfície de fratura para os corpos de solo-cimento preparados com a massa cimentícia de referência, ou seja, corpos cimentícios sem incorporação de resíduo de rocha ornamental. Todos os corpos cimentícios foram curados durante 28 dias.

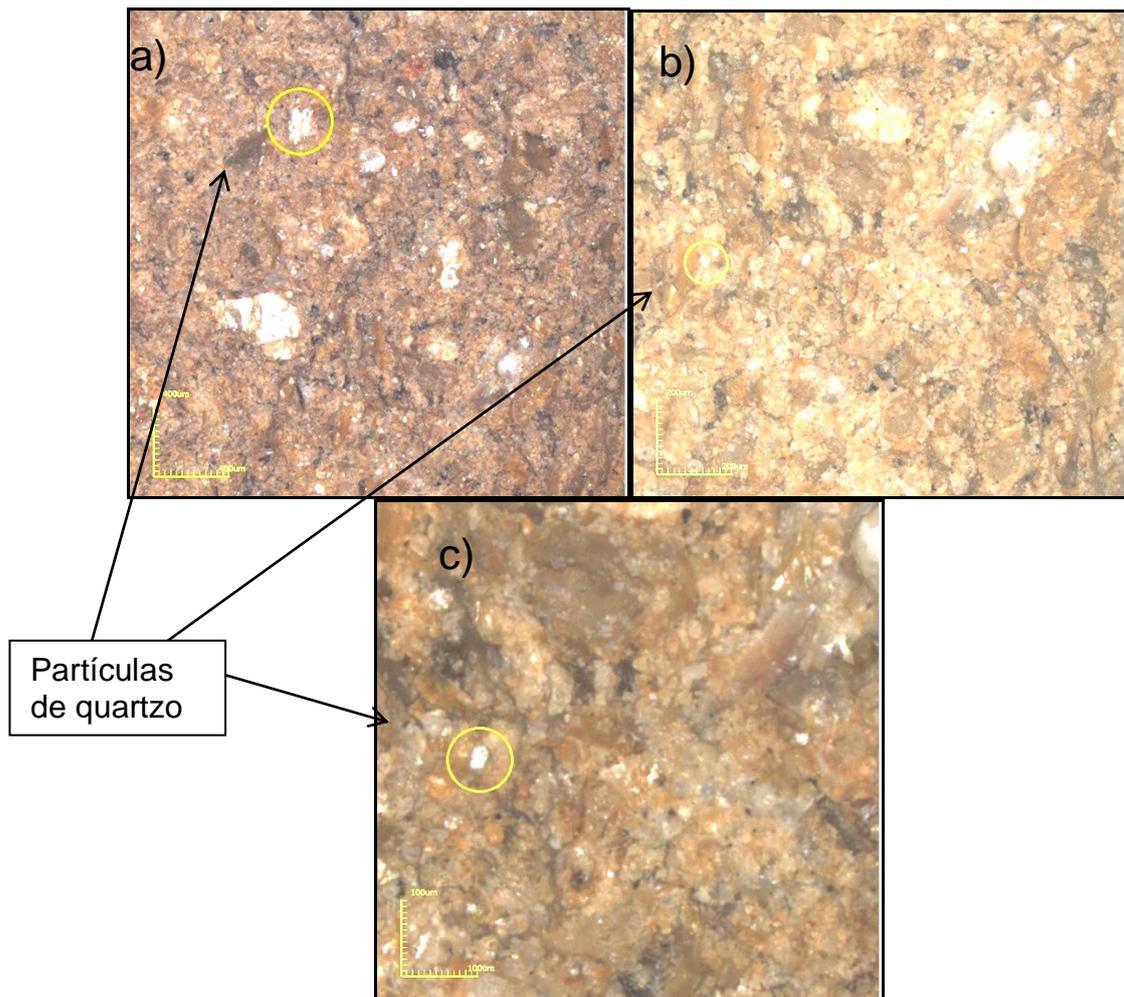


Figura 4.16 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0 % de resíduo de rocha ornamental: a) 108X; b) 216X; c) 430X.

Verifica-se que a massa de referência apresenta grande quantidade de quartzo destacada por círculos amarelos. Isso pode estar relacionado com o alto teor de partículas de quartzo livre (SiO_2) encontrado no solo arenoso (Tabela 4.2). Nota-se que as partículas de quartzo estão entre a pasta de cimento, pasta essa formada pelas fases anidras do cimento que em contato com água irão formar principalmente: portlandita (CH), silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e etringita. Os produtos de hidratação do cimento, especialmente os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) são os principais responsáveis pela resistência mecânica após hidratação do cimento.

A Figura 4.17 mostra a microestrutura da superfície de fratura, obtida por micrografia confocal dos corpos cimentícios com incorporação de 10 % de resíduo de rocha ornamental. Percebe-se a presença de partículas de quartzo.

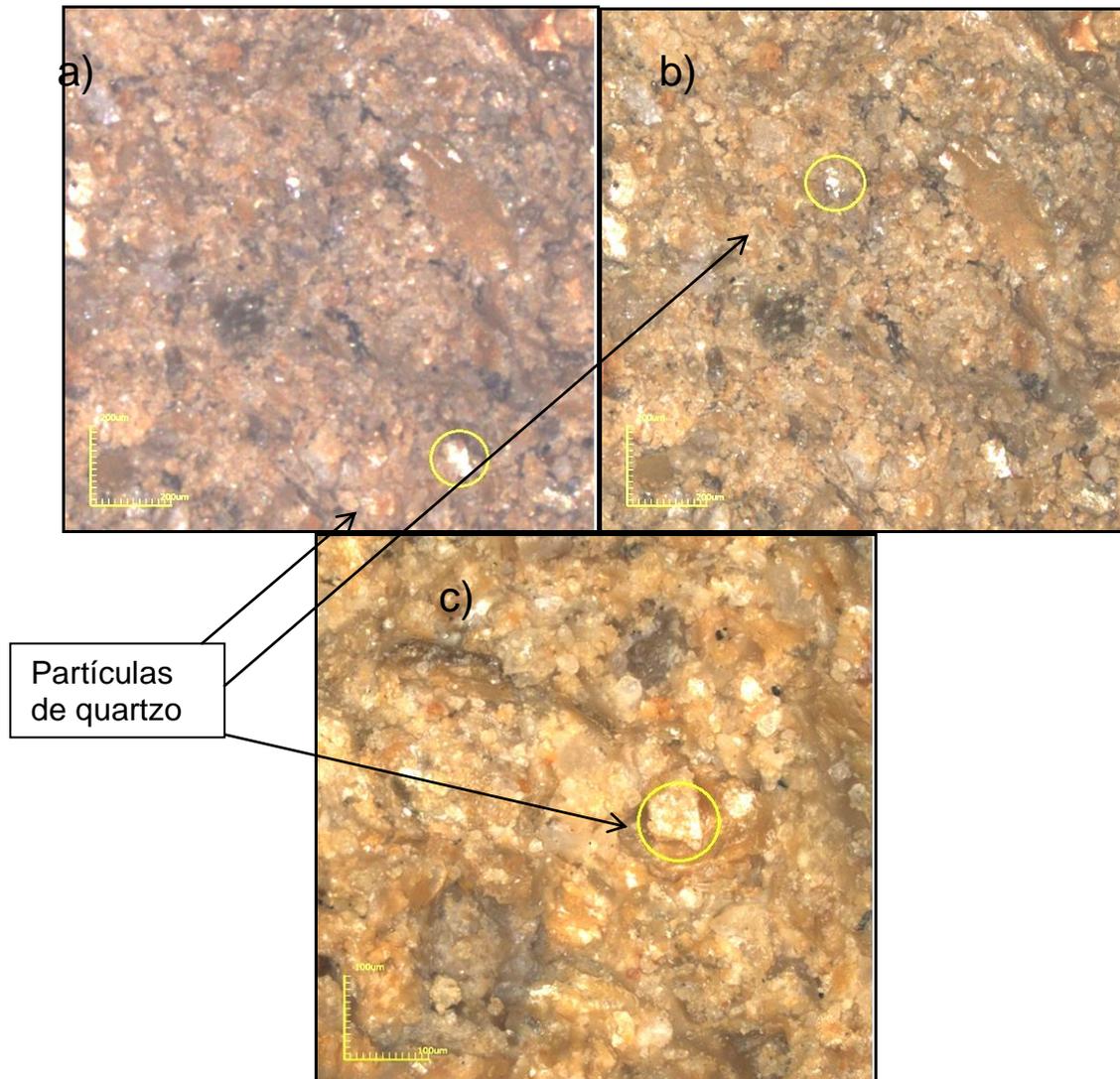


Figura 4.17 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 10 % de resíduo de rocha ornamental: a) 108X; b) 216X; c) 430X.

Observa-se na Figura 4.18 que a massa cimentícia incorporada com resíduo de rocha ornamental apresentou poros, identificados através de setas brancas. O surgimento desses poros nos corpos cimentícios incorporados com o resíduo podem estar relacionados com a hidratação do cimento.

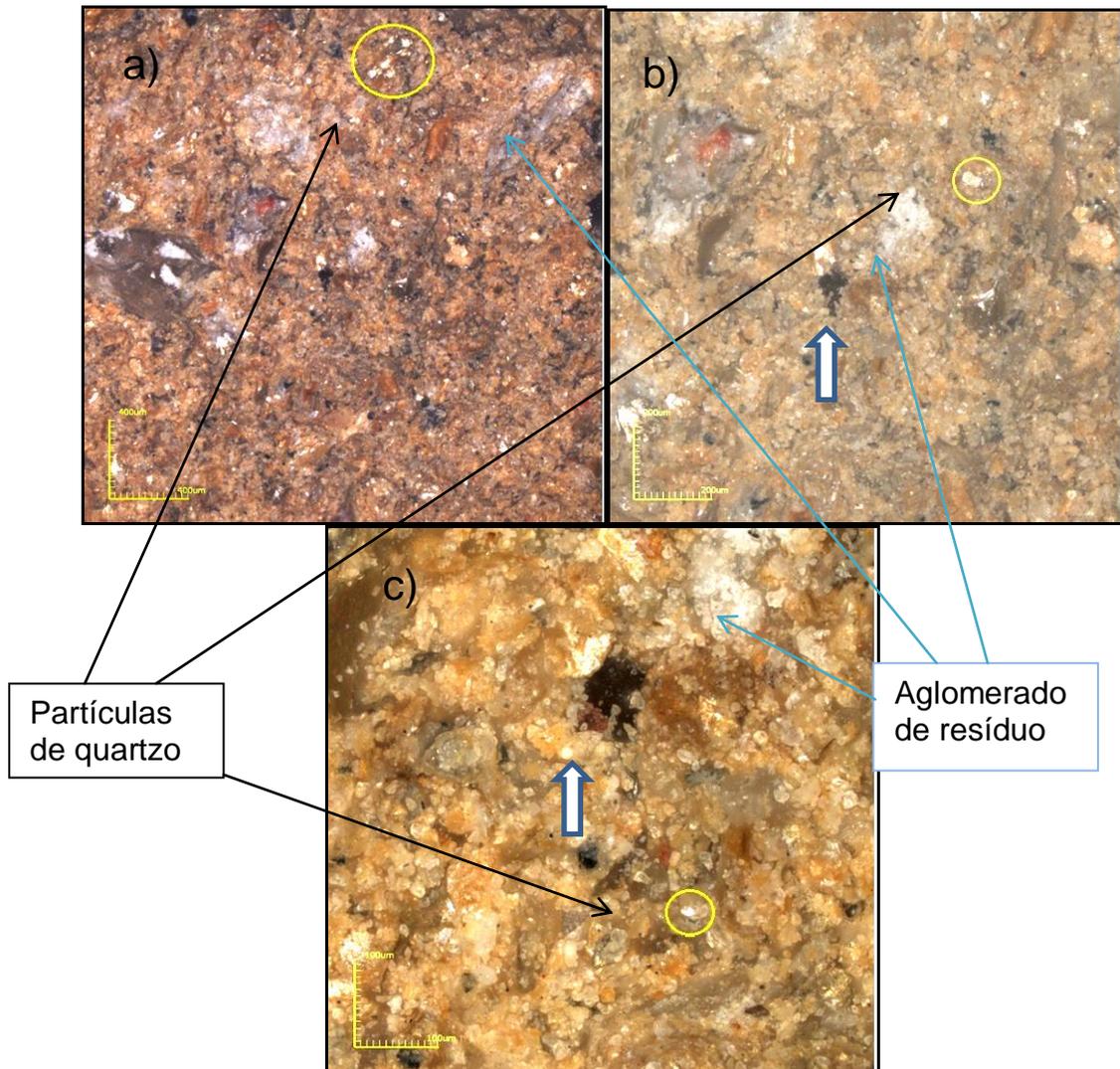


Figura 4.18 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 20 % de resíduo de rocha ornamental: a) 108X; b) 216X; c) 430X.

A Figura 4.19 mostra a microestrutura da superfície de fratura obtida por micrografia confocal dos corpos cimentícios com incorporação de 30 % de resíduo de rocha ornamental. Pode-se observar que a massa cimentícia incorporada com o resíduo de rocha ornamental apresenta aglomerados do resíduo, identificados através das setas azuis, que pode estar relacionado com o processo de homogeneização da mistura das matérias-primas.

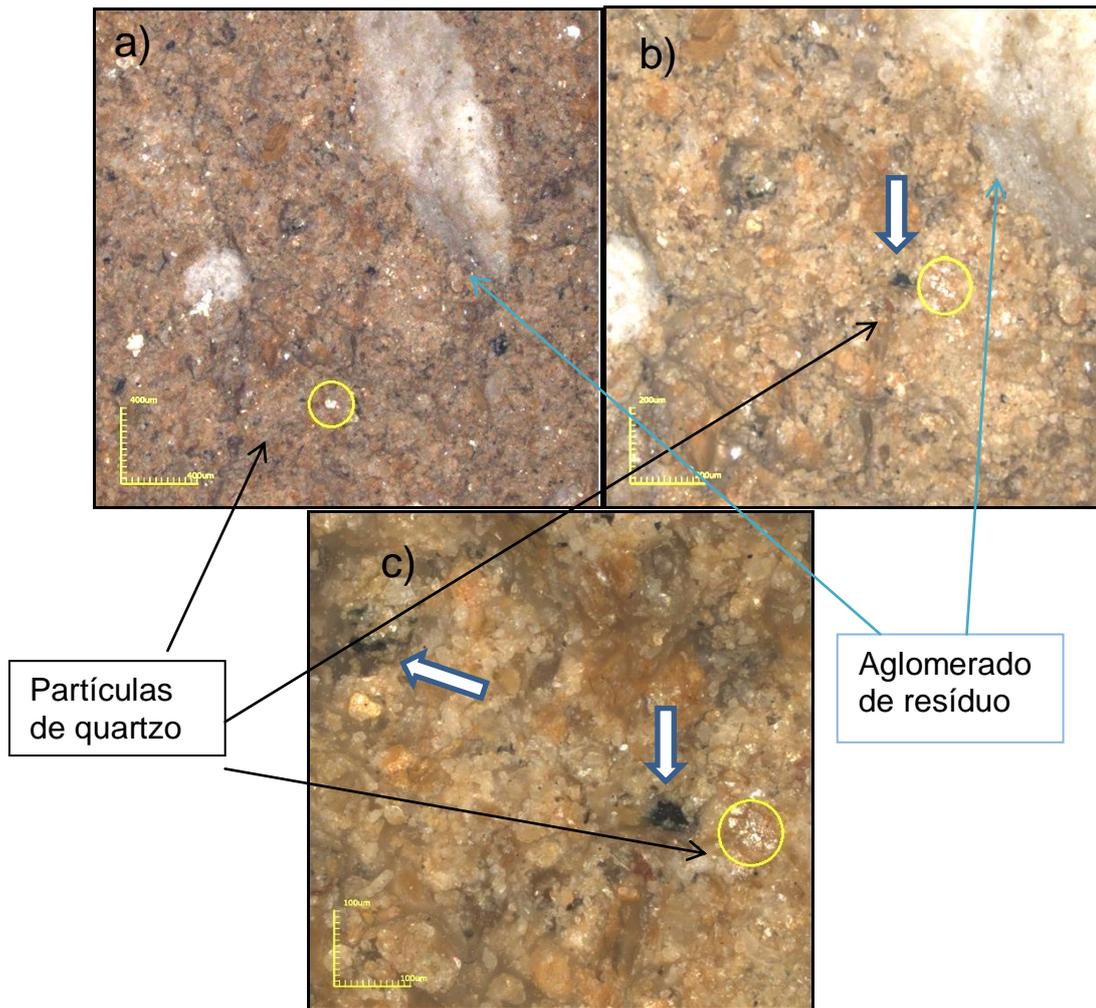


Figura 4.19 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 30 % de resíduo de rocha ornamental: a) 108X; b) 216X; c) 430X.

A Figura 4.20 mostra a microestrutura da superfície de fratura obtida por micrografia confocal dos corpos cimentícios incorporados com 40 % de resíduo de rocha ornamental. Nota-se que a pasta de cimento aparece em maior quantidade, o que pode estar relacionado com a baixa capacidade de absorção de água do resíduo de rocha ornamental, ajudando possivelmente o processo de hidratação do cimento.

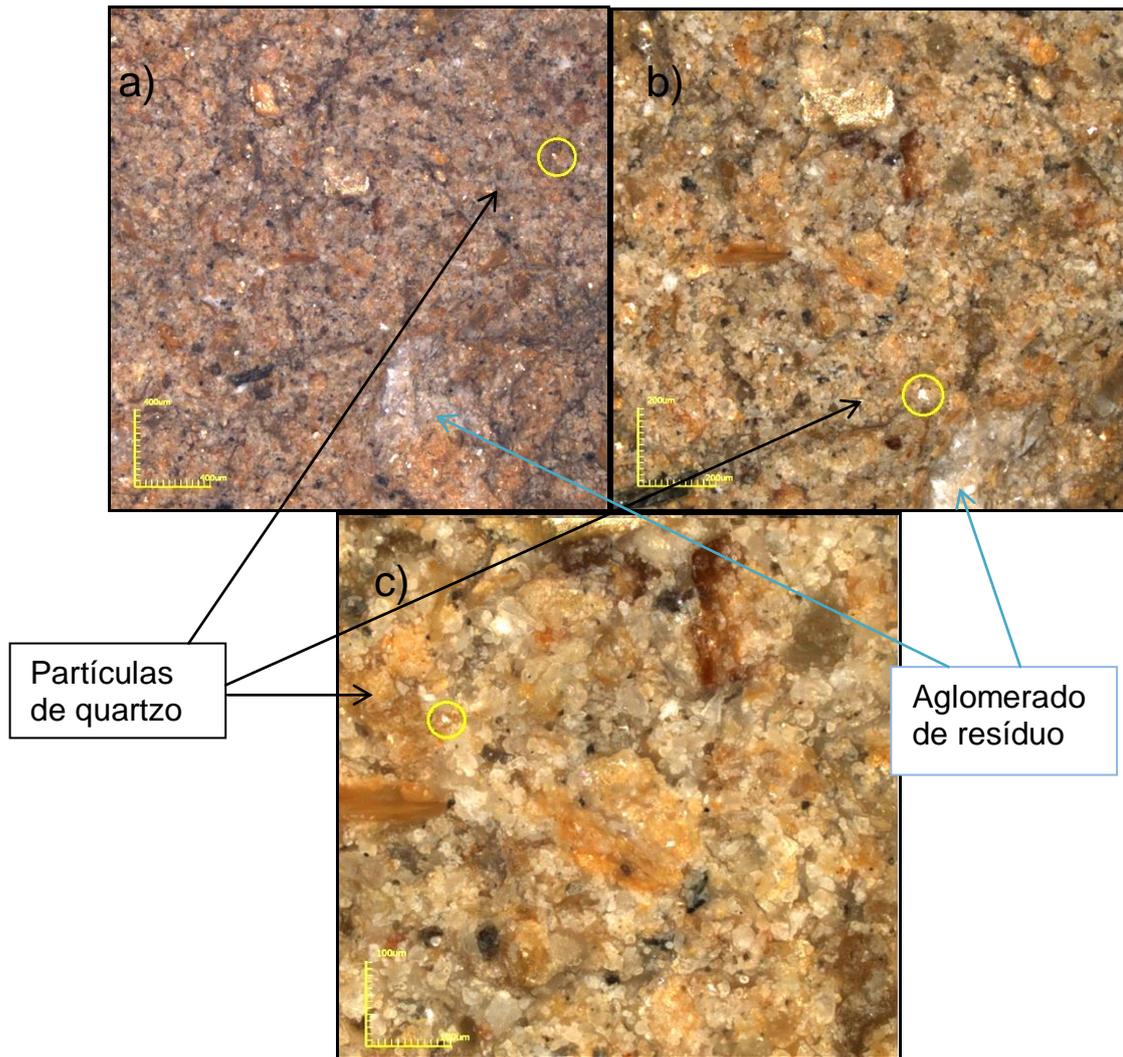


Figura 4.20 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 40 % de resíduo de rocha ornamental: a) 108X; b) 216X; c) 430X.

A Figura 4.21 apresenta a micrografia de todos os traços estudados. Percebe-se que os corpos-de-prova com incorporação de 30 % de resíduo apresenta maior quantidade de poros abertos. Essa análise comprova os resultados encontrados de suas propriedades físicas: maior absorção de água e menor resistência mecânica. Analisando os corpos-de-prova com incorporação de 40 % de resíduo de rocha ornamental, observa-se um grande empacotamento dos grãos, com maior redução de poros. Essa observação está de acordo com os resultados obtidos das propriedades físicas: menor absorção de água e grande aumento da resistência mecânica.

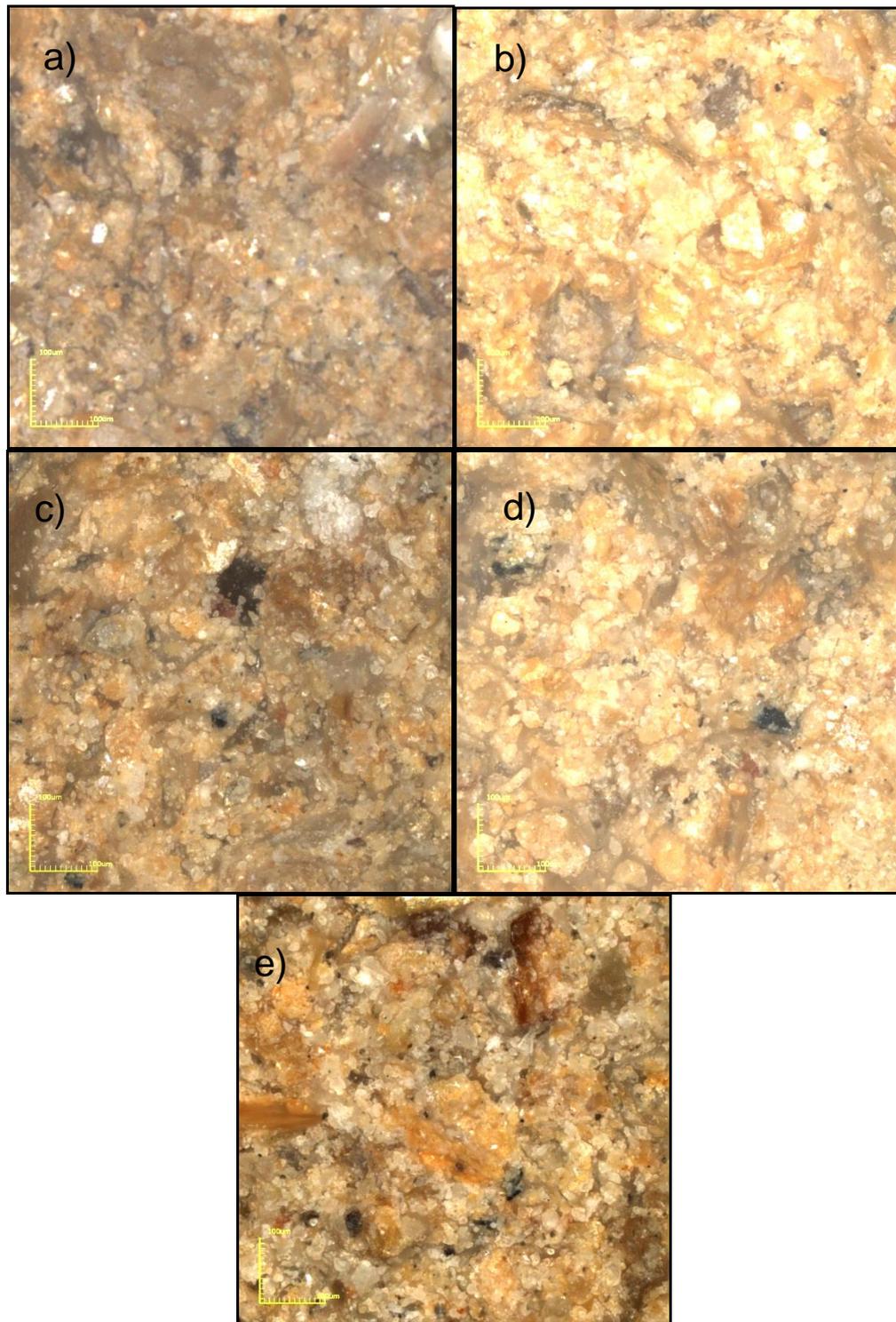


Figura 4.21 – Microestrutura da superfície de fratura para a composição de 0, 10, 20, 30 e 40 % de resíduo de rocha ornamental em 430X.

4.3.2. Análise de fases

A Figura 4.22 apresenta os difratogramas de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 10 % de resíduo de rocha ornamental, após passarem por um período de cura de 28 dias. A adição do resíduo de rocha ornamental não modificou as fases cristalinas: caulinita, quartzo, calcita, gipsita, hematita e muscovita. Percebe-se que aconteceu a introdução de nova fase de etringita.

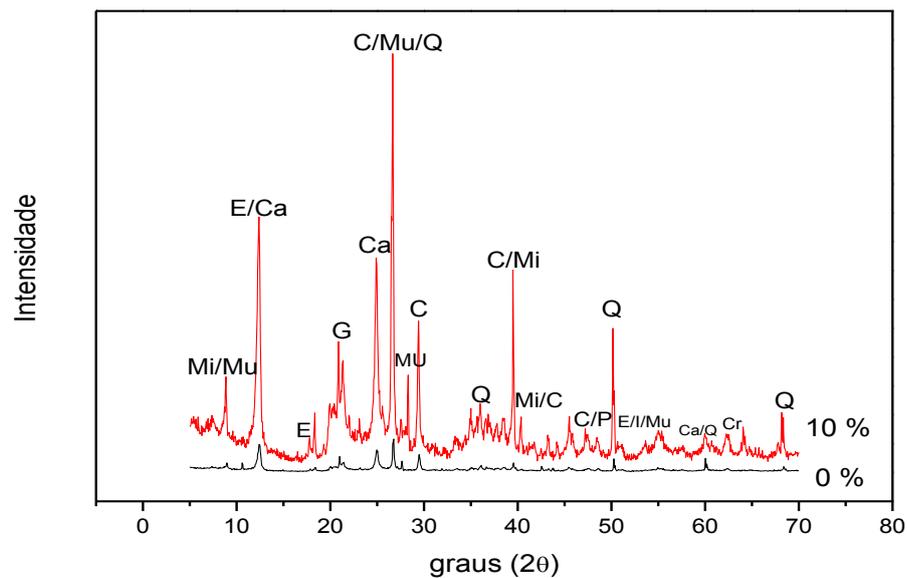


Figura 4.22 – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 % e 10 % de resíduo de rocha ornamental: Mu = Muscovita; Mi = Mica; E = Etringita; C = Calcita; Ca = Caulinita; G = Gipsita; I = Ilita; Q = Quartzo; Cr = Cristobalita e P = Pirita.

A Figura 4.23 apresenta os difratogramas de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 20 % de resíduo de rocha ornamental, após passarem por um período de cura de 28 dias. Percebe-se a introdução de um pico intenso de goetita. O quartzo e a mica muscovita são fases ditas residuais, ou seja, provenientes da matéria-prima no seu estado natural.

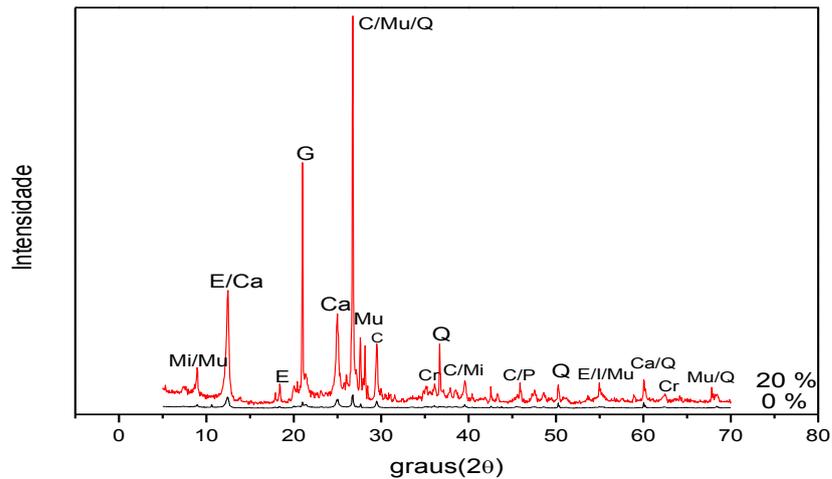


Figura 4.23 – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 % e 20 % de resíduo de rocha ornamental: Mu = Muscovita; Mi = Mica; E = Etringita; C = Calcita; Ca = Caulinita; G = Gipsita; I = Ilita; Q = Quartzo; H; Cr = Cristobalita e P = Pirita.

A Figura 4.24 apresenta os difratogramas de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 30 % de resíduo de rocha ornamental, após passarem por um período de cura de 28 dias. O difratograma mostra a fase de Cristobalita que é uma das formas polimórficas da sílica.

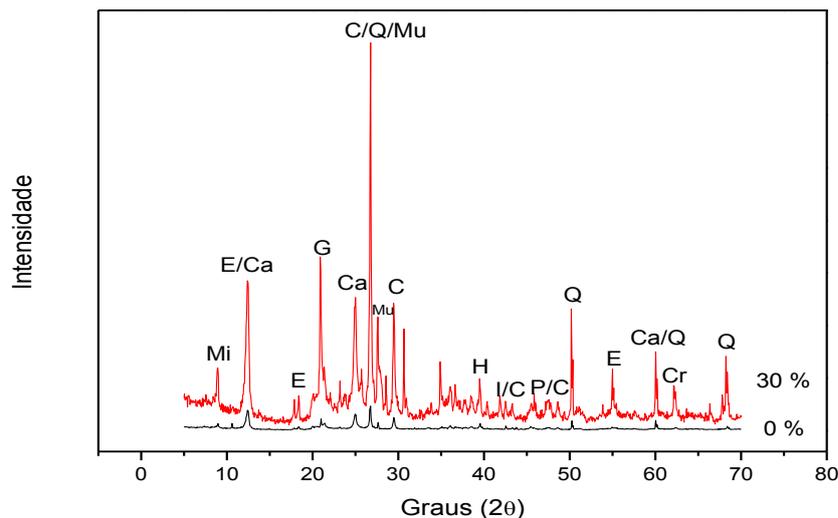


Figura 4.24 – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 % e 30 % de resíduo de rocha ornamental: Mu = Muscovita; Mi = Mica; E = Etringita; C = Calcita; Ca = Caulinita; G = Gipsita; I = Ilita; Q = Quartzo; H = Hematita; Cr = Cristobalita e P = Pirita.

A Figura 4.25 apresenta os difratogramas de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 e 40 % de resíduo de rocha ornamental. Percebe-se que aconteceu a introdução de uma nova fase de silicato de cálcio hidratado. De acordo com Siqueira (2013), durante o processo de cura, é formada essa fase por causa da hidratação das fases anidras do cimento.

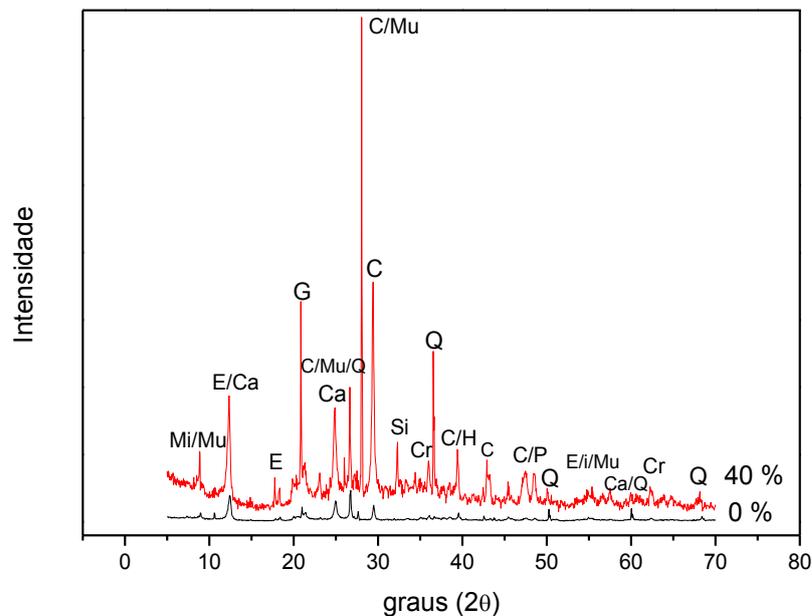


Figura 4.25 – Difração de raios-X dos corpos cimentícios com incorporação de 0 % e 40 % de resíduo de rocha ornamental: Mu = Muscovita; Mi = Mica; E = Etringita; C = Calcita; Ca = Caulinita; G = Gipsita; I = Ilita; Q = Quartzo; H = Hematita; Cr = Cristobalita; P = Pirita e Si = Silicato de cálcio Ca_3SiO_5 .

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Conclusões

Na presente dissertação de mestrado foi estudada a influência da incorporação de resíduo de rocha ornamental nas propriedades e microestrutura de corpos cimentícios para emprego em tijolo solo-cimento. Os resultados experimentais obtidos neste trabalho permitem as seguintes conclusões:

- ✓ O solo arenoso é constituído quimicamente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3). O solo arenoso apresentou perda ao fogo da ordem de 9 %. Do ponto de vista mineralógico, o solo arenoso é constituído principalmente por quartzo. Do ponto de vista físico, o solo arenoso utilizado apresenta alto teor de areia ($60 \mu\text{m} \leq x < 600 \mu\text{m}$), da ordem de 39 %, resultando em uma distribuição granulométrica muito próxima daquela recomendada para a produção de tijolo solo-cimento de acordo com a ABCP. O solo arenoso utilizado é um material que apresenta alta plasticidade ($\text{IP} = 24,5 \%$).
- ✓ Em relação à análise química, o resíduo de rocha ornamental é constituído principalmente por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de cálcio (CaO). Além disso, o resíduo de rocha ornamental contém baixa perda ao fogo (4,4 %). Do ponto de vista mineralógico, o resíduo de rocha ornamental é constituído principalmente por quartzo. Do ponto de vista físico, o resíduo de rocha ornamental utilizado é um material não plástico e apresenta baixo teor de partículas finas ($< 2 \mu\text{m}$) de 1,1 %.
- ✓ O resíduo de rocha ornamental quando incorporado à massa de solo e cimento modifica as características física, química e mineralógica dela.
- ✓ A incorporação de resíduo de rocha ornamental provocou alterações nas propriedades tecnológicas dos corpos cimentícios de solo-cimento. Foi constatado que o resíduo de rocha ornamental tende a diminuir a aumentar a resistência à compressão e diminuir a absorção de água para corpos de prova com 40 % de resíduo.

- ✓ Análise mineralógica nas amostras incorporadas indicou que a presença de resíduo de rocha ornamental na massa de solo e cimento não modificou as fases cristalinas majoritárias, mas introduziu novas fases como etringita e silicato de cálcio hidratado, provenientes da hidratação do cimento.
- ✓ Todos os corpos-de-prova incorporados com 0, 10, 20, 30 e 40 % de resíduo de rocha ornamental ultrapassaram os valores mínimos para a resistência à compressão estabelecidos na norma NBR 10834 (ABNT, 1994) e os corpos de prova com 10, 20, 30 e 40 % de resíduo adquiriram valores individuais de absorção de água abaixo de 22 % como recomendados por normas brasileiras.
- ✓ A reutilização do resíduo de rocha ornamental na produção de solo-cimento, pode ser uma alternativa tecnológica viável, para uma destinação mais apropriada, do resíduo da indústria de extração e beneficiamento de rochas ornamentais. Além de ser uma iniciativa importante do ponto de vista ambiental.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar a fabricação de tijolos solo-cimento incorporado com resíduo de rocha ornamental em escala piloto, submetendo-os ao processo de cura e ensaios tecnológicos;
- Realizar análise químico-ambiental nos tijolos de solo-cimento contendo resíduo de rocha ornamental, com ênfase sobre o seu potencial poluidor (ensaio de lixiviação e solubilização);
- Elaborar novos traços com teores de cimento de 8,5 % e 9,5 % e incorporação de resíduo de até 50 %.
- Realizar um estudo de comparação de custo da produção de tijolos solo-cimento com tijolos incorporados com 40 % de resíduo de rocha ornamental.

Referências Bibliográficas

ALEXANDRE, J.; ALVES, M. G.; LIMA, T. V. (2006) *Estudo da estabilização de um solo argiloso com adição de cimento - Study of the stabilization of a loamy soil with addition of cement*. CEFET. Campos dos Goytacazes – RJ. Revista Vértices, vol. 8, nº 1/3, jan./dez.

ALMEIDA, N.; Branco, F.; Santos, J. R. (2007) Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. *Building and Environment*, vol. 42. 810-819p.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais - ABIROCHAS (2012) Balanço sucinto das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2011. Informe 01/2012. São Paulo – SP.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais - ABIROCHAS (2013) Síntese das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento no Período Janeiro a Agosto de 2013. Informe 14/2013. São Paulo – SP.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS (2013b) O setor de rochas ornamentais e de revestimento: situação atual, demandas e perspectivas frente ao novo marco regulatório da mineração Brasileira. Fevereiro de 2013. Informe 06/2013. São Paulo – SP.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS (2004) Rochas Ornamentais no século XXI – Situação Brasileira. São Paulo – SP.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1986) Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio. São Paulo.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002) Guia básico de utilização de cimento Portland. 7 ed. São Paulo.

Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1985) Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais. São Paulo.

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

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural - determinação da resistência à compressão e absorção de água. Método de ensaio. 2p. ABNT. NBR- 10836. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996) Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem. 3p. ABNT. NBR- 13554. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) Solo-cimento - Dosagem para emprego como camada de pavimento. Procedimento. 4p. ABNT. NBR- 12253. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Tijolo maciço de solo-cimento. ABNT. NBR- 8491. 4p. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) Resíduos sólidos – Classificação. ABNT. NBR- 10004. Rio de Janeiro, RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990) Execução de sub-base ou base de solo-cimento. ABNT. NBR- 12254. Rio de Janeiro, 1990. 5p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com utilização de prensa manual. 8p. ABNT. NBR- 10832. Rio de Janeiro, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) Especificações. ABNT. NBR- 12653. Rio de Janeiro, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994) Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural. 3p. ABNT. NBR- 10834. Rio de Janeiro, 1994.

CABALA, G. V. E. (2007) *Estudo do comportamento mecânico de estruturas de solo-cimento reforçado com fibras de coco e hastes de bambu*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –Natal – RN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S.; CASSA, J. C. S. (2001). Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção. EDUFBA; Caixa Econômica Federal, Salvador.

CARVALHO, M. B. M. (2008) *Impactos e conflitos da produção de cimento no Distrito Federal*. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) –Brasília-DF, Universidade de Brasília-UnB.

CHIODI, F. C. (2005) *Situação do setor de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil – mercados interno e externo*. IN: SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 5. Anais... Recife: Deminas, DAU, PPGEMinas, SBG, SINDIPEDRAS. 28p.

COLLATTO, D.; BERGMANN, C. P.; (2009) *Emprego de resíduo de celulose da indústria de papel como matéria prima para fabricação de material cerâmico*. Revista Cerâmica Industrial, v. 13, n. 3, p. 30-35.

DESTEFANI, A. Z. (2009) *Adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para a produção de blocos prensados de encaixe*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Federal do Norte Fluminense- UENF.

DONDI, M.; MARSIGLI, M.; FABBRI, B. (1997). Recycling of industrial and urban wastes in brick production – a review. *Tile Brick*. 13. 218 – 225p.

FAGANELLO, A. M. P. (2006) *Rejeitos de britagem de origem basáltica: caracterização e utilização em solo-cimento na região de Londrina (PR)*. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Londrina - PR, Universidade Estadual de Londrina, 134p.

FERREIRA, R. C.; GLOBO, J. C.; CUNHA, A. H. (2008) Incorporation of rice and brachiaria husk and their effects on physical and mechanical properties of soil-cement bricks. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 28, n. 1.

FILHO, H. F. M.; POLIVANOV, H.; MOTHÉ, C. G. (2005) Reciclagem dos resíduos sólidos de Rochas Ornamentais. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*. Vol. 28-2. Rio de Janeiro – RJ. 139-151p.

Fundação de Tecnologia do estado do Acre (1999) – Cartilha para produção de tijolo solo-cimento. Rio Branco – AC.

GONÇALVES, J. P. (2000) *Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Porto Alegre - RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 120 p.

GRANDE, F. M. (2003) *Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – São Carlos - SP, Universidade de São Paulo, 165p.

LIMA, R. C. O. (2010) *Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Campina Grande – PB, Universidade Federal de Campina Grande.

LIMA, R. C. O.; NEVES, G. A.; CARVALHO, J. B. Q.; (2010) Durabilidade de tijolos de solo-cimento produzidos com resíduo de corte de granito. *REMAP- Revista Eletrônica de Materiais e Processos*. Campina Grande-PB. V. 5.5, 24-31p.

LOPES, J. L. M. P.; (2007) *Influência da utilização do resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), como fíler, nas propriedades do concreto*. Dissertação

(Mestrado em engenharia do Meio Ambiente) – Goiânia – GO, Universidade Federal de Goiás.

MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. (2008) Caracterização e classificação de resíduo sólido de “pó de rocha granítica” gerado na indústria de rochas ornamentais. *Química Nova*, vol. 31, nº. 6, 1301-1304p.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; (2002) O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 2, 303-313p.

MIRANDA, R. A. C. (2007) Viabilidade técnica da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Goiânia – GO, Universidade Federal de Goiás.

MOTA, J. D.; OLIVEIRA, D. F.; SOUSA, A. A. P.; LARANJEIRA, E.; MONTEIRO, M. R. S. (2010) Utilização do resíduo proveniente do desdobramento de rochas ornamentais na confecção de tijolos ecológicos de solo-cimento. *3º Simpósio Iberoamericano de Ingeniería de Resíduos*. Campina Grande – Paraíba.

NEVES, C. (2006) *O uso de solo-cimento em edificações*. A experiência do CEPED. CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. Universidade do Estado da Bahia. Bahia.

NEVES, et. al. (2005) Seleção de solos e métodos de controle em construção com terra. Práticas de campo. Proterra. Brasil.

PEREIRA, D. B.; PEZZUTO, C. C. (2010) Estudo do solo-cimento para a fabricação de tijolos ecológicos. Anais do XV encontro de iniciação científica da PUC – Campinas. ISSN – 1982- 0178.

PEREZ, E. J. A.; TERRADAS, R.; MANENT, M.R; SEIJAS, M.; MARTINEZ, S. (1996). Inertization of industrial wastes in ceramic materials. *Industrial Ceramics*. V. 16 7-10p.

PESSOA, F. H. C. (2004) *Análises dos solos de urucu para fins de uso rodoviário*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Brasília - DF, Universidade de Brasília - UnB.

PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M.D. (2010) Utilização de solos arenosos para obtenção de tijolos de solo-cimento. *Revista Cerâmica industrial*, v. 15, n. 5-6. 30-36p.

Pinto, P.C. (2010) Investigação de parâmetros do ccr com incorporação de escória de alto forno para utilização como base de pavimentos Dissertação (Mestrado em Engenharia) – São Paulo-SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

RODRIGUES, M. L. A. (2008) *Adição de resíduos de argamassas mistas na produção de tijolos modulares de solo-cimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Goiânia – GO, Universidade Federal de Goiás.

RODRIGUES, L. P. (2012) *Incorporação de resíduo de estação de tratamento de água em tijolo solo-cimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

SANTOS, A. D. (2004) *Estudos de propriedades físicas e químicas de um novo cimento selador endodôntico*. Dissertação (Mestrado em Ciências de Materiais) -Ilha Solteira - SP, Universidade Estadual Paulista- UNESP.

SEGANTINI, A. A. da S. (2000) *Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira-SP*. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI, Departamento de Construções Rurais, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-São Paulo, 176p.

SETEC – Secretaria de educação profissional e tecnológica. (2007) Rochas Ornamentais – *Ornamental rocks*. Ministério da Educação. Brasília – DF. 28 p.

SILVA, M. V. (2011) *Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água*. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear) – Materiais -São Paulo - SP. Universidade de São Paulo, USP.

SILVA, S. R. (2005) *Tijolos de solo - cimento reforçado com serragem de madeira*. Dissertação (Mestrado em Engenharias de Estrutura) - Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

SILVA, A. P. M. (2013) *O uso do Tijolo de solo-cimento na construção civil*. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) – *SNIC 50 anos*. (2006) Rio de Janeiro – RJ. Acesso em www.snic.org.br. 20/03/2012.

SIQUEIRA, F. B. (2013) *Avaliação da incorporação de resíduo grits nas propriedades e microestrutura de tijolo solo-cimento*. Dissertação (Mestrado de Engenharia e Ciência de Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

SOUZA, S. J. G.; HOLANDA, J. N. F.; (2005) Development of red wall tile bodies produced by dry process with Brazilian raw materials. Reino Unido. *Ceramics International*, v. 31, n.2, 215-222p.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; FILHO, J. D. (2007) Formulação de massa de revestimento cerâmico com argilas plásticas de Campos dos Goytacazes (RJ) e Taguá (SP). *Revista Cerâmica Industrial*. v. 6, n.6. p. 43-49p.