

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO  
CALCÁRIO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE EM BLOCOS DE  
ENCAIXE DE SOLO-CIMENTO**

**BRUNO RANGEL FRANÇA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

2017

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO  
CALCÁRIO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE EM BLOCOS DE  
ENCAIXE DE SOLO-CIMENTO**

**BRUNO RANGEL FRANÇA**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: D.Sc. Jonas Alexandre

Co-Orientador: D.Sc. Sérgio Rafael Cortes de Oliveira

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

2017

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO  
CALCÁRIO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE EM BLOCOS DE  
ENCAIXE DE SOLO-CIMENTO**

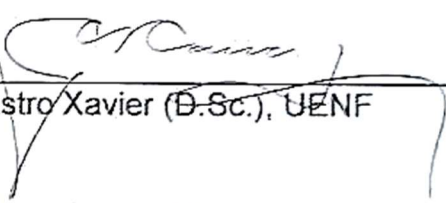
**BRUNO RANGEL FRANÇA**

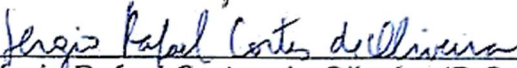
Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

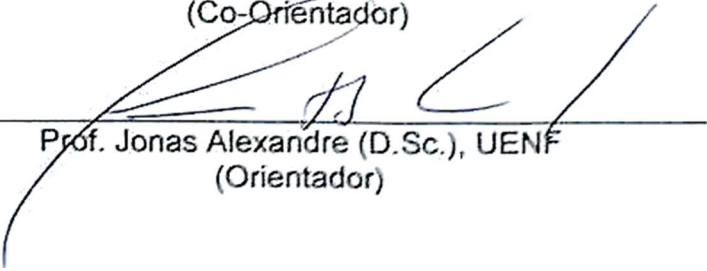
Aprovada em 05 de setembro de 2017.

Comissão Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Frederico Muylaert Margem (D.Sc.), UniRedentor

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Gustavo, de Castro Xavier (D.Sc.), UENF

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Sérgio Rafael Cortes de Oliveira (D.Sc.), IFF  
(Co-Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Jonas Alexandre (D.Sc.), UENF  
(Orientador)

## DEDICATÓRIA

A Deus e aos meus pais, Maurício Peixoto França e Neide Aparecida da Silva Rangel França, que sempre serão minhas maiores referências.

## AGRADECIMENTOS

*“Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e ele tudo fará” . Salmos 37:5*

A Deus por tudo em minha vida, e ao Divino Espírito Santo por iluminar meus caminhos.

Aos meus pais, Maurício Peixoto França e Neide Aparecida da Silva Rangel França, que sempre me apoiaram e me incentivaram ao longo de minha trajetória.

A minha irmã, Brenda Rangel França, pelo apoio e compreensão.

A minha noiva, Tatiana Borges Berriel, pelo carinho, companheirismo e compreensão.

A Universidade Estadual Norte Fluminense (UENF), pela oportunidade oferecida por meio de seu programa de pós-graduação.

Aos meus orientadores, D.sc. Jonas Alexandre e D.sc. Sérgio Rafael Cotes de Oliveira, pela confiança, paciência, orientação e conhecimento passado para realização deste trabalho.

Aos professores da UENF por todo apoio e ensinamento, em especial aos Professores D.sc. Gustavo de Castro Xavier e Cláudio Luiz Melo de Souza pelo incentivo, orientação e amizade.

Ao amigo do Laboratório, Gelcimar, pela ajuda e parceria na realização do programa experimental.

Aos técnicos e bolsistas do LECIV e do LAMAV, Milton, Michel, Geovana, Vanúzia e Rosane, pelo auxílio e apoio.

As empresas Artecercâmica Sardinha e Polita Mármore, pela doação dos materiais e parceria.

A todos amigos verdadeiros que fiz na UENF, em especial ao amigo Lucas e Israel que contribuíram de forma direta para construção deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos amigos que acreditaram e contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Objetivo geral .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Justificativa .....	3
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	4
2.1 Solo .....	4
2.1.1 Propriedades dos solos .....	6
2.1.2 Composições do solo .....	7
2.1.3 Estabilização do solo na engenharia .....	7
2.2 Cimento Portland .....	8
2.2.1 Estabilização com cimento Portland .....	13
2.3 O setor de rochas ornamentais .....	14
2.3.1 Calcário proveniente do beneficiamento do mármore .....	18
2.3.2 Estabilização com adição de resíduo calcário .....	19
2.3.3 Utilização do resíduo calcário como subproduto na construção civil .....	20
2.4 Solo-cimento .....	21
2.4.1 Fatores que condicionam a qualidade de mistura solo-cimento .....	22
2.4.2 Métodos de dosagens da mistura solo-cimento .....	25
2.4.3 Bloco de solo-cimento .....	26
2.4.4 Propriedades tecnológicas do bloco de solo-cimento .....	29
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	32
3.1 Materiais .....	32
3.1.1 Solo .....	32
3.1.2 Calcário .....	33
3.1.3 Cimento .....	35
3.1.4 Água .....	35
3.2 Métodos .....	35
3.2.1 Caracterização das matérias primas .....	37
3.2.1.1 Caracterização física .....	37
a) Granulometria .....	37
b) Massa específica real dos grãos .....	38

c) Teor de umidade .....	38
3.2.1.2 Caracterização química .....	43
3.2.1.3 Caracterização mineralógica .....	44
3.2.2 Confeção dos corpos-de-prova .....	44
3.2.3 Traços estudados .....	44
3.2.4 Preparação das Misturas .....	46
3.2.5 Moldagem .....	46
3.2.6 Cura .....	47
3.2.7 Análise das propriedades das misturas .....	48
3.2.7.1 Ensaio de massa específica .....	48
3.2.7.2 Ensaio de absorção de água .....	49
3.2.7.3 Ensaio de resistência à compressão simples .....	50
3.2.7.4 Ensaio de durabilidade .....	51
3.2.8 Critério de avaliação dos blocos .....	52
3.2.9 Tratamento dos dados .....	52
3.2.9.1 Tamanho Mínimo de Lote (TML) .....	52
3.2.9.2 Critério de Chauvenet .....	53
3.2.9.3 Delineamento experimental .....	55
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>56</b>
4.1 Caracterização dos materiais .....	56
4.1.1 Caracterização física do solo .....	56
4.1.1.1 Granulometria do solo .....	56
4.1.1.2 Massa específica real dos grãos do solo .....	57
4.1.1.3 Teor de umidade da mistura .....	57
4.1.2 Caracterização física do resíduo calcário .....	64
4.1.2.1 Granulometria do resíduo calcário .....	64
4.1.2.2 Massa específica real dos grãos do resíduo .....	65
4.1.3 Caracterização química do solo .....	66
4.1.4 Caracterização química do resíduo calcário .....	66
4.1.5 Caracterização mineralógica do solo .....	68
4.1.6 Caracterização mineralógica do resíduo calcário .....	69
4.2 Análise das propriedades dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário ..	70
4.2.1 Massa específica aparente .....	71
4.2.2 Absorção de água .....	73
4.2.3 Resistência à compressão simples .....	75

4.2.4 Durabilidade .....	78
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>86</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>
7.1 Referências de normas técnicas.....	87
7.2 Referência de obras citadas .....	88
Apêndice A.....	97
Apêndice B.....	98
Apêndice C.....	100
Apêndice D.....	105



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Estrutura do solo.....	4
Figura 2-2: Perfil do solo.....	5
Figura 2-3: Gráfico de emissão específica de CO <sub>2</sub> por tonelada de cimento.....	11
Figura 2-4: Mapa do estado do Espírito Santo com atividades em rochas ornamentais.....	15
Figura 2-5: Principais estados do Brasil exportadores de rochas ornamentais (US\$ 1.000).....	16
Figura 2-6: Processo de geração do resíduo do beneficiamento do mármore: (a) Tear de corte diamantado; (b) Máquina polidora de chapas.....	18
Figura 2-7: Difratograma de raios-X de uma amostra do resíduo do beneficiamento do mármore.....	19
Figura 2-8: Blocos de solo-cimento.....	27
Figura 2-9: Construções em blocos de encaixe de solo-cimento: (a) Casa em alto padrão; (b) Fachada residencial.....	29
Figura 3-1: Processo de tratamento do solo: (a) Peneiramento do solo; (b) Solo pronto para utilização.....	32
Figura 3-2: Logística de separação do resíduo do beneficiamento do mármore: (a) Reservatórios de água e resíduo; (b) Filtro prensa; (c) Armazenamento de resíduo; (d) Carga de resíduo para destinação final.....	34
Figura 3-3: Secagem e armazenamento do resíduo do beneficiamento do mármore: (a) Secagem ao ar livre; (b) Armazenamento.....	34
Figura 3-4: Transporte dos blocos recém conformados.....	35
Figura 3-5: Fluxograma da caracterização das matérias primas.....	36
Figura 3-6: Fluxograma da execução dos corpos-de-prova e ensaios.....	37
Figura 3-7: Ensaio de compactação estática: (a) Preparação da amostra para ensaio; (b) Prensa hidráulica; (c) Corpos-de-prova cilíndricos; (d) Ensaio de resistência à compressão.....	42
Figura 3-8: Metodologia experimental de compactação: (a) Compactação dinâmica do ensaio Proctor Normal; (b) Instrumentos do ensaio Proctor Normal.....	43

Figura 3-9: Patologias no processo de produção dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário com teores de resíduo acima de 50%: (a) Formação de grumos; (b) Bloco quebradiço por falta de coesão; (c) Fissuras no momento da prensagem.....	45
Figura 3-10: Fluxograma do processo de fabricação do bloco de solo-cimento pela NBR 12024 (ABNT, 2012).....	46
Figura 3-11: Mistura das matérias-primas utilizando um misturador de eixo vertical e borrifador do tipo costal.....	46
Figura 3-12: Prensa hidráulica utilizada para confecção de blocos de encaixe. ....	47
Figura 3-13: Cura úmida dos blocos de encaixe. ....	48
Figura 3-14: Procedimento para ensaio de absorção de água.....	50
Figura 3-15: Procedimento para ensaio de resistência à compressão simples: (a) Capeamento em uma face dos blocos; (b) Blocos capeados; (c) Ensaio de resistência à compressão.....	51
Figura 3-16: Procedimento de secagem dos corpos-de-prova a 72 °C em estufa. ...	51
Figura 4-1: Curva granulométrica do solo. ....	56
Figura 4-2: Resultados dos ensaios de compactação estática e compactação Proctor Normal para os traços: (a) $T_r$ ; (b) $T_{10}$ ; (c) $T_{20}$ ; (d) $T_{30}$ ; (e) $T_{40}$ ; (f) $T_{50}$ . ....	58
Figura 4-3: Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos pontos obtidos nos ensaios de compactação estática para os traços: (a) $T_r$ ; (b) $T_{10}$ ; (c) $T_{20}$ ; (d) $T_{30}$ ; (e) $T_{40}$ ; (f) $T_{50}$ .....	59
Figura 4-4: Perda de água por excesso de umidade: (a) e (b) Molde dos corpos-de-prova cilíndricos indicando perda de água na base. ....	62
Figura 4-5: Curva granulométrica do resíduo calcário.....	65
Figura 4-6: Difratoograma de raios-x do solo. ....	68
Figura 4-7: Difratoograma de raios-X do resíduo calcário.....	69
Figura 4-8: Dispersão dos resultados de massa específica aparente. ....	72
Figura 4-9: Dispersão dos resultados de absorção de água. ....	74
Figura 4-10: Dispersão dos resultados de resistência à compressão simples. ....	77
Figura 4-11: Dispersão da perda de massa pelo ensaio de durabilidade.....	80
Figura 4-12: Comparativo da dispersão da resistência à compressão dos blocos submetidos à degradação e os blocos não submetidos à degradação. ....	82
Figura 4-13: Modelo de Powers para variação na porosidade de acordo com o grau de hidratação do cimento. ....	84

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação da granulometria do solo.....	6
Tabela 2.2: Tipos de cimentos produzidos no Brasil.....	10
Tabela 2.3: Compostos anidros básicos do cimento Portland.....	11
Tabela 2.4: Faixas aproximadas da proporção dos principais componentes do cimento Portland.....	12
Tabela 2.5: Dados mundiais da produção de rochas ornamentais.....	15
Tabela 2.6: Comparativo de prensas para componentes de solo estabilizado. ....	30
Tabela 2.7: Critérios para seleção de solos. ....	31
Tabela 2.8: Limites para controle de qualidade dos blocos de solo-cimento. ....	31
Tabela 3.1: Composição dos traços utilizados para a fabricação dos corpos-de-prova. ....	45
Tabela 3.2: Valores estipulados pela NBR 10834 (ABNT, 2013) para os ensaios de absorção de água e resistência à compressão dos blocos de solo-cimento.....	48
Tabela 3.3: Valores de DR <sub>0</sub> .....	54
Tabela 4.1: Massa específica real dos grãos de alguns minerais. ....	57
Tabela 4.2: Composição dos traços para confecção dos blocos.....	64
Tabela 4.3: Composição química do solo. ....	66
Tabela 4.4: Composição química do resíduo calcário do beneficiamento do mármore. ....	67
Tabela 4.5: EDX de uma amostra de resíduo calcário do beneficiamento do mármore. ....	67
Tabela 4.6: Valores médios de massa específica aparente seca dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário para os diferentes traços. ....	71
Tabela 4.7: Valores médios de absorção de água dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário para os diferentes traços e idades de cura. ....	73
Tabela 4.8: Valores médios de resistência a compressão simples dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário para os diferentes traços e idades de cura.....	76
Tabela 4.9: Valores médios de perda de massa dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário para os diferentes traços.....	79
Tabela 4.10: Valores médios de resistência à compressão dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário submetidos à degradação e não submetidos à degradação para os diferentes traços.....	81

## ÍNDICE DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland  
ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento  
CTC – Capacidade de Troca Catiônica  
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado  
CH – Hidróxido de Cálcio  
CP V-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial  
DRX – Difração de Raios-X  
DNPN – Departamento Nacional de Produção Mineral  
EDX – Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia  
HRB – *Highway Research Board Of America*  
IP – Índice de Plasticidade  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo  
LC – Limite de Contração  
LL – Limite de Liquidez  
LP – Limite de Plasticidade  
LMAV – Laboratório de Materiais Avançados da UENF  
LECIV – Laboratório de Engenharia Civil da UENF  
LCFIS – Laboratório de Ciências Físicas da UENF  
NBR – Norma Brasileira  
PCA – Portland Cement Association  
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento  
TML – Tamanho Mínimo de Lote  
UENF – Universidade Estadual Norte Fluminense

## RESUMO

A demanda por novos materiais que apresentem viabilidade técnica e econômica em consonância com as questões ambientais é crescente e fundamental. Este trabalho objetiva a incorporação do resíduo calcário proveniente do beneficiamento do mármore, em substituição parcial do solo numa mistura de solo-cimento, para a confecção de blocos de encaixe prensados, avaliados a partir dos resultados das propriedades físicas, mecânicas e de desempenho. As matérias-primas foram submetidas às caracterizações física, química, mineralógica. Foram fabricados corpos-de-prova em formatos de blocos de encaixe, conformados em prensa motorizada hidráulica, nos traços contendo 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em massa de resíduo calcário em substituição parcial do agregado com teor de cimento fixado em 10%. Os corpos-de-prova foram avaliados inicialmente por meio do ensaio de massa específica e após submetidos ao processo de cura em câmara úmida. Foram realizados ensaios tecnológicos em várias idades para avaliação da absorção de água, resistência a compressão individual dos blocos e durabilidade por molhagem e secagem. Por meio do programa experimental estabelecido, foi possível concluir que a utilização da mistura solo-cimento e calcário, resultou em vantagens técnicas para a produção de blocos de encaixe, obtendo um novo produto com características aperfeiçoadas e dentro das especificações, enquadradas pelas normas vigentes, além de oferecer mais uma alternativa para o destino final do resíduo calcário.

**Palavras-Chave:** Solo-cimento; Bloco de solo-cimento; Resíduo do mármore.

## ABSTRACT

The demand for new materials that present technical and economic feasibility in line with environmental issues is growing and fundamental. This essay aims to incorporate the limestone from the processing of marble, in partial replacement of the soil in a soil-cement mixture, for the production of pressed blocks, evaluated from the results of the physical, mechanical and performance properties. The raw materials were submitted to physical, chemical and mineralogical characterization. Test specimens were fabricated in plug-in block shapes, formed in a hydraulic motor press, in traces containing 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% in mass of limestone in partial replacement of the aggregate with a cement content of 10%. The specimens were initially evaluated by means of the specific mass test and after, submitted to the wet chamber cure process. Technological trials were carried out at various ages to evaluate water absorption, individual block strength and durability by wetting and drying. By means of the established experimental program, it was possible to conclude that the use of the soil-cement and limestone mixture resulted in technical advantages for the production of plug-in blocks, obtaining a new product with improved characteristics and within the specifications following current standards, besides offering another alternative to the final destination of limestone.

**Keywords:** Soil-cement; Soil-cement block; Marble residue.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as questões ambientais, junto à escassez dos recursos naturais, a tendência por arquiteturas mais sustentáveis, as reduções dos custos de produção, além de vários outros fatores, têm forçado todos os setores a adquirirem novos conceitos e soluções técnicas que objetivam a sustentabilidade de suas atividades. Sendo assim, construções em alvenarias de blocos vêm se destacando como uma alternativa na busca da valorização e incorporação de grande quantidade de resíduos descartados, sendo eles de diversos tipos e origens. Em muitos casos, a adição desses tipos de materiais traz vantagens técnicas e, com isso, a redução dos custos do produto final.

Nas últimas três décadas, o setor de rochas ornamentais vem sendo uma das atividades industriais que mais cresce no Brasil. Segundo dados da Associação Brasileira de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS, a produção brasileira atingiu a equivalência de 9,3 milhões de toneladas no ano de 2016, com consumo interno de 5,9 milhões de toneladas para granitos e mármore (ABIROCHAS, 2017). Em consequência da grande produção de rochas ornamentais, são geradas toneladas de rejeitos que ocupam grandes espaços ao ar livre e poluem o solo. No processo de beneficiamento do mármore, cerca de 20% a 30% dos blocos são transformados em resíduos, por este motivo, a adoção de práticas de reaproveitamento e reciclagem desses detritos em indústrias é desejável, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e para a redução dos custos.

O resíduo proveniente do beneficiamento do mármore pode ser tratado basicamente por calcário, pois os mármore são rochas metamórficas formadas por minerais carbonáticos como calcita e dolomita (ALMEIDA *et al.*, 2015). A larga escala em que esses resíduos são gerados e com as mais diversas composições químicas e mineralógicas, alinhados a processos construtivos já conhecidos, trazem à Engenharia Civil e à Engenharia de Materiais a possibilidade de desenvolver novos tipos de materiais, contribuindo assim para a redução de tais rejeitos.

Diversos tipos de métodos na construção civil são utilizados nos tempos atuais; alguns deles marcaram épocas e são considerados até hoje como insubstituíveis. Um exemplo é o método convencional de construção que consiste na utilização dos

elementos estruturais em concreto armado e fechamento em tijolos de cerâmica. Em analogia a outras técnicas em diferentes áreas e setores, a evolução da construção civil é bastante baixa. A construção modular utilizando blocos estruturais vem há algum tempo ganhando espaço no setor da construção civil. A utilização deste processo construtivo minimiza desperdícios, pois toda a construção é planejada do início ao fim, devido à execução de suas paredes serem baseadas em blocos com geometria e dimensões exatas e que se completam.

A produção dos elementos construtivos utilizando o sistema de prensagem facilita o molde dos blocos, pois estes são confeccionados com encaixe do tipo macho e fêmea. Essa característica de encaixe, junto à modulação das paredes, permite ao construtor ganho de tempo e redução do consumo de matérias-primas, pois seu processo executivo dispensa a utilização de argamassa de assentamento entre os blocos e sua furação permite a passagem de dutos para instalações, evitando também o volume de entulho que seria gerado pelos rasgos feitos nas paredes para passagem de tais instalações.

Portanto, estudar e compreender essa tecnologia, com os resultados voltados a apresentar alternativas na composição e fabricação do produto e também oferecer mais uma opção para o destino final do resíduo calcário poderá apontar tendências e mudanças no cenário da construção civil rumo à adoção de técnicas de construção mais sustentáveis.

### **1.1 Objetivo geral**

Avaliar a viabilidade de incorporação do resíduo calcário proveniente do beneficiamento do mármore coletado na cidade de Cachoeiro do Itapemirim – ES, em substituição parcial do solo numa mistura de solo-cimento para a confecção de blocos de encaixe prensados.

### **1.2 Objetivos específicos**

Têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização física, química e mineralógica das matérias-primas utilizadas na mistura de solo-cimento;



- Produzir blocos de solo-cimento e resíduo calcário para avaliação de suas propriedades físicas e mecânicas;
- Avaliar a massa específica dos blocos após o período de 1 dia de cura;
- Avaliar a absorção de água e resistência à compressão individual dos blocos após o período de 7, 28 e 56 dias de cura;
- Submeter os blocos produzidos a ensaios de durabilidade por molhagem e secagem após o período de 7 dias de cura. Avaliar a resistência à compressão dos blocos submetidos ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem aos 28 dias.

### **1.3 Justificativa**

Na cidade de Cachoeiro do Itapemirim – ES, resíduos oriundos do beneficiamento de rochas, neste caso do mármore, são descartados ao ar livre ocupando grandes áreas ou dispensados em depósitos irregulares sob a forma de rejeito. Contudo, a possibilidade de utilização destes resíduos gerados é vista com muita expectativa, já que órgãos ambientais locais vêm pressionando as empresas produtoras de rochas para encontrar uma destinação definitiva para os resíduos.

O presente trabalho corrobora com a busca de soluções que atenuam o impacto ambiental causado pela produção mineral, incorporando o resíduo calcário em uma mistura de solo-cimento para confecção de blocos de encaixe prensados, possibilitando o emprego do produto dentro das indústrias do beneficiamento de rochas ornamentais da região, agregando valores aos resíduos gerados, produzindo um novo produto com características enquadradas nas normas vigentes com potencial de comercialização e uso na construção civil.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Solo

Os solos são compostos por um conjunto de partículas sólidas que são geradas através da desagregação de rochas por meio de ações físicas e químicas, provenientes da atuação da água de percolação ou outro líquido e ar, ou ainda ambos, em seus espaços intermediários (PINTO, 1998). Sendo assim, de acordo com Blücher (1951), o solo contém uma estrutura porosa em que as partículas se encontram livres para se movimentarem.

O solo depende de tal movimentação das partículas sólidas entre si, o que altera o volume em porcentagens das suas fases constituintes (sólido, água e ar) fazendo com que ocorra um afastamento do solo do padrão dos sólidos idealizados na Mecânica dos Sólidos Deformáveis.

A Figura 2-1 ilustra a estrutura do solo.

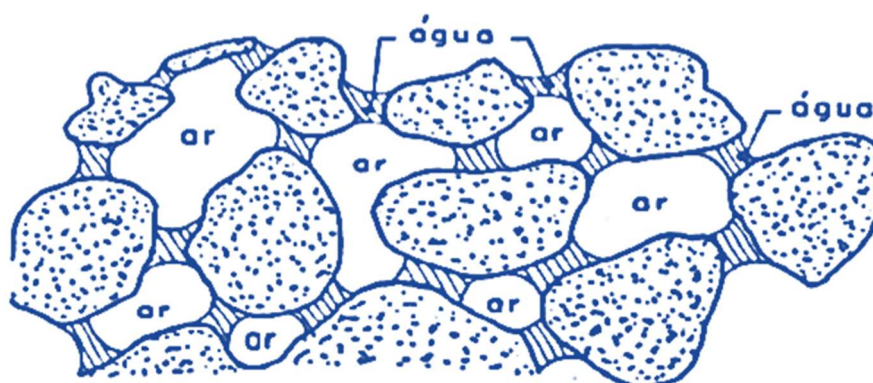


Figura 2-1: Estrutura do solo.

Fonte: Grande (2003).

É essencial o conhecimento dos perfis do solo, pois através da análise de cada camada do solo (horizonte) é possível realizar determinadas observações relevantes quanto ao emprego de cada tipo de solo para sua utilização prática em solo-cimento.

O HORIZONTE A é constituído basicamente de rocha alterada, húmus e materiais orgânicos. Azambuja (1979) classifica esse tipo de horizonte como de pequena espessura, medindo aproximadamente entre 20 cm e 30 cm e de cor cinza escura. Podendo ocorrer no perfil de arenito camadas de espessura chegando até 2 m. Rico em húmus, uma matéria orgânica que tem grande relação química com a

cal livre (CaO) liberada na hidratação do cimento e que, mesmo em pequenas concentrações, pode influenciar na resistência do material. Em alguns casos, recomenda-se a utilização da cal nesse tipo de solo antes da adição de cimento.

O HORIZONTE B é constituído de quantidade reduzida de matéria orgânica, argila com predominância caulínica e acúmulo de óxidos de ferro e alumínio. São solos de difícil pulverização, o que gera um grande problema na homogeneização da mistura do solo-cimento.

O HORIZONTE C é constituído de material residual, pouco ou parcialmente alterado, e de fácil pulverização, o que indica uma preferência deste na aplicação do solo-cimento. Porém, devido à sua composição mineralógica, pode conter partículas frágeis e quebradiças, ocasionando a necessidade de uma análise de dosagem antes da utilização.

O HORIZONTE R é constituído de rochas não alteradas (rocha mãe) que deram origem ao solo.

A Figura 2-2 mostra o perfil do solo com várias camadas sobrepostas, denominadas horizontes.

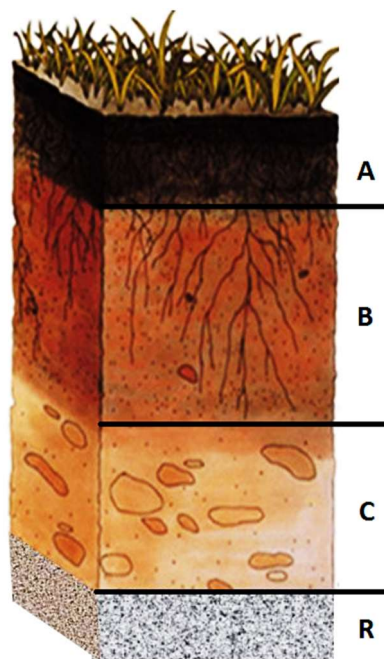


Figura 2-2: Perfil do solo.

Fonte: [www.agronomiadigital.blogspot.com](http://www.agronomiadigital.blogspot.com)

### 2.1.1 Propriedades dos solos

Existem diversas maneiras de classificar o solo devido ao seu amplo campo de aplicação e a cada ciência relacionada a ele. Para a utilização do solo-cimento a classificação mais relevante é quanto à granulometria.

A NBR 6502 (ABNT, 1995), classifica as partículas do solo conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Classificação da granulometria do solo.

<b>Classificação</b>	<b>Diâmetro dos grãos (mm)</b>
Bloco de rocha	$\varnothing > 1000$
Matacão	$200 < \varnothing < 1000$
Seixo	$60 < \varnothing < 200$
Grânulo	$2 < \varnothing < 60$
Areia grossa	$0,6 < \varnothing < 2$
Areia média	$0,2 < \varnothing < 0,6$
Areia fina	$0,06 < \varnothing < 0,2$
Silte	$0,002 < \varnothing < 0,06$
Argila	$\varnothing < 0,002$

Fonte: NBR 6502 (ABNT, 1995).

Os solos mais apropriados para a fabricação de blocos de solo-cimento segundo a *Portland Cement Association – PCA* (1969) são os solos arenosos e pedregulhosos, que possuem as seguintes proporções: areia variando entre 65% e 90% e silte mais argila entre 10% e 35%. Outro estudo realizado pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento – CEPED (1999) define como os solos mais apropriados os que possuem as seguintes proporções: areia, variando entre 45% e 90%; silte mais argila, entre 10 e 55%; argila, menor que 20% e Limite de Liquidez inferior a 45%. Essas proporções indicam valores ideais para uma menor utilização de cimento para a sua estabilização, o que se deve ao melhor comportamento mecânico. Caso os solos não apresentem essas características, alguns autores levam em consideração uma possível correção granulométrica do solo, resultando em benefícios técnicos e econômicos (LIMA E MELO, 2014).

### 2.1.2 Composições do solo

Explicou-se, anteriormente, que o comportamento de um solo está relacionado à sua granulometria, no entanto Azambuja (1979) e Sabbag (1980) apontam que podem ocorrer comportamentos diferentes entre solos com partículas de mesma forma, mas com estruturas diferentes, devido à composição mineralógica.

Os argilominerais são os principais minerais que compõem a fração fina (argilosa) do solo, apresentam tamanho inferior a 2  $\mu\text{m}$ , sendo constituídos por silicatos de alumínio ou magnésio hidratados, com propriedades plásticas e capacidade de troca de cátions. Os principais grupos de argilominerais são caulinitas, illitas e montmorilonitas.

O solo como descrito, possui minerais e orgânicos, estes por sua vez possuem cargas que podem ser positivas ou negativas, havendo um predomínio das cargas negativas. A capacidade de atrair e trocar cátions dos solos devido às cargas negativas dos íons adsorvidos em sua superfície é definida como Capacidade de Troca Catiônica (C.T.C.) e a principal atuação dessa propriedade no solo-cimento é a troca de cálcio proveniente dos produtos de hidratação do cimento, o que pode gerar fenômenos como a floculação, que modifica a curva granulométrica do solo e lhe confere produtos hidratados com maior estabilidade.

Segundo Silva (2005) *apud* Amaral (2016), camadas superficiais do solo não podem ser utilizadas na prática para a fabricação de solo-cimento, pois há um grande predomínio de matéria orgânica, o que interfere na hidratação do cimento, prejudicando sua resistência. Ensaios de caracterização são fundamentais para determinar as propriedades dos solos. Cebrace (1981) indica que muitas vezes a escolha do solo pode ser realizada no local de origem e através de ensaios práticos e simples, apenas baseados na consistência e plasticidade das amostras.

### 2.1.3 Estabilização do solo na engenharia

Estabilizar um solo é combinar diferentes tipos de materiais buscando suas características positivas, dando condições de resistir às deformações pelo período em que sua função exija atender a tais características.

É preciso notar que a utilização da prática do solo como um material de construção deve ser executada com critério, pois pode acarretar em problemas

devido às variadas propriedades desse material, por estas serem complexas e heterogêneas.

Para a correção de um solo podem ser empregados diversos métodos, entre eles, a correção granulométrica, mecânica e a adição de compostos químicos.

A estabilização dos solos pode ser facilmente alcançada pela distribuição dos diversos diâmetros dos grãos (estabilização granulométrica), ou seja, esta metodologia consiste na adição ou retirada de partículas de solo, visando alterar sua propriedade, enquadrando o mesmo em uma determinada faixa granulométrica de modo a atender às especificações de projeto.

Estabilizar um solo mecanicamente baseia-se em compactar o solo por meio de ações mecânicas, aplicando uma determinada energia sobre o mesmo, a fim de alterar sua densidade, resistência, compressibilidade, porosidade e permeabilidade (GOÍS, 2012).

A estabilização de um solo realizada através de um processo químico, trata-se de modificações na sua estrutura a partir da introdução de aditivos no solo para o melhoramento de suas propriedades físicas e mecânicas, possibilitando sua utilização para fins de projetos. Neste âmbito, é oportuno expor que os materiais mais utilizados para esse tipo de estabilização são: Cimento Portland, cal, betume e fibras (GOÍS, 2012).

A escolha do tipo adequado de estabilização é influenciada por uma série de fatores como: finalidade da obra, viabilidade econômica, propriedades do solo que será corrigido e características dos materiais.

## **2.2 Cimento Portland**

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002) o cimento Portland é classificado como um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes e que, sob a ação da água, endurece, não mais se decompondo, mesmo que seja novamente submetido ao meio aquoso.

O processo de fabricação do cimento Portland, consiste na mistura e moagem das matérias primas: calcário e argila, em determinadas proporções que são submetidas a um processo de queima em forno do tipo rotativo a elevadas

temperaturas. O produto gerado é chamado de clínquer, que por fim, é moído e recebe adição de sulfato de cálcio di-hidratado (gesso) para o controle da pega.

A adição do gesso pode permitir que o cimento permaneça trabalhável por pelo menos uma hora e trinta minutos. Sem o gesso, o processo de hidratação do cimento inicia o tempo de pega em aproximadamente quinze minutos, o que tornaria difícil sua aplicação.

Existem vários outros compostos de características distintas que adicionadas ao cimento conferem melhorias nas suas propriedades, tais como:

- A pozolana: é um material silicoso ou silico-aluminoso, que pode ser encontrado de forma natural ou artificial e que contém um elevado teor de sílica. A sua adição ao cimento proporciona maior resistência a meios agressivos como esgotos, água do mar e solos sulfurosos. Serve para diminuir o calor de hidratação, a segregação de agregados, a permeabilidade e propicia maior trabalhabilidade e estabilidade de volume.

- A escória de alto-forno: é denominada como um subproduto da produção de ferro e de aço de um alto-forno, um produto vítreo sob forma granulada que por fim é, então, seco e moído. Diferentes tipos de teores de adições são utilizados junto à moagem do clínquer o que resulta em cimentos com características diversas, algumas delas são: maior resistência final e maior durabilidade, menor risco de fissuração, melhor trabalhabilidade e plasticidade, menores porosidade e permeabilidade.

- O fíler calcário: corresponde ao calcário moído adicionado com o intuito de promover a diminuição do índice de vazios, com isso melhorando a trabalhabilidade e diminuindo a porosidade e permeabilidade.

Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2013) o Brasil alcançou a 5ª posição no ranking mundial de produção de cimento, chegando a produzir cerca de 70,2 milhões de toneladas, ficando na 4ª posição com 71,0 milhões de toneladas no ranking de consumo. São produzidos no Brasil cinco tipos diferentes de cimento Portland, além do cimento branco, que são normatizados pela ABCP e estão apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Tipos de cimentos produzidos no Brasil.

<b>Tipo do cimento</b>	<b>Classe de resistência (MPa)</b>	<b>Clínquer + gesso (%)</b>	<b>Escória de alto-forno (%)</b>	<b>Pozolana (%)</b>	<b>Filer (%)</b>	<b>Norma Brasileira</b>
CP I	25, 32,40	100	0	0	0	NBR 5732 (ABNT,1990)
CP I-S	25, 32,40	95 – 99	0	01 – 05	0	
CP II-E	25, 32,40	56 – 94	06 – 34	0	0 – 10	NBR 11578 (ABNT,1991)
CP II-Z	25, 32,40	76 – 94	0	06 – 14	0 – 10	
CP II-F	25, 32,40	90 – 94	0	0	6 – 10	
CP III	25, 32,40	25 – 65	35 – 70	0	0 – 5	NBR 5735 (ABNT,1991)
CP IV	25, 32	45 – 85	0	15 – 40	0 – 5	NBR 5736 (ABNT,1991)
CP V -ARI		95 – 100	0	0	0 – 5	NBR 5733 (ABNT,1991)
CP V - ARI RS		*	*	*	0 – 5	NBR 5737 (ABNT,1992)

\*A NBR 5737 (ABNT, 1992) não fixa limites para o CP V-ARI RS no que se refere as adições de escória ou material pozolânico.

Fonte: Cimento Itambé (2017).

Grandes impactos ambientais e sociais são gerados pela fabricação do cimento, sendo responsável por 3% da emissão mundial dos gases de efeito estufa e por 5% da emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), que acarretam o aquecimento global. As fábricas de cimento estão entre as maiores emissoras de poluentes atmosféricos, liberando metais tóxicos (mercúrio, chumbo, arsênio etc.), dioxinas e os furanos – produtos de combustão incompleta de ácidos halogenados (MAURY E BLUMENSCHIN, 2012).

Segundo o SNIC (2013), a indústria brasileira através dos anos vem se destacando como uma das mais eficientes no controle das emissões de gases do efeito estufa, o que se deve à utilização de combustíveis alternativos (resíduos e biomassas) e adições de escória de alto-forno, cinzas volantes e outras. O Brasil, em 1990, ocupava uma posição privilegiada na emissão específica de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e veio reduzindo seu percentual destas emissões, chegando a ocupar, em 2012, o patamar de menor emissor de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento, conforme a Figura 2-3.



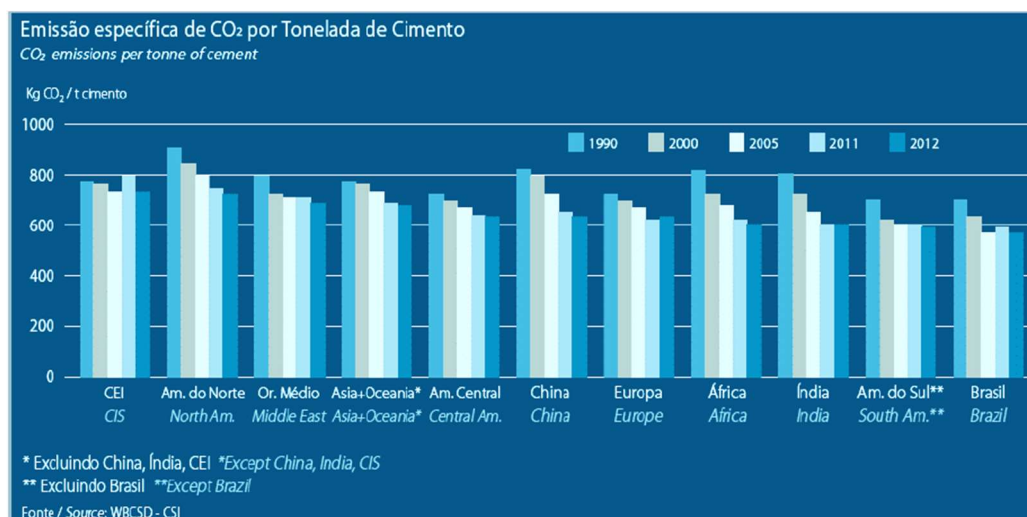


Figura 2-3: Gráfico de emissão específica de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento.  
Fonte: (SNIC, 2013).

Devido à preocupação atual com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais, são buscadas soluções que minimizem os impactos ambientais resultantes da produção cimentícia, a partir de materiais que substituam ou diminuam o uso do cimento. Este trabalho aborda diretrizes que estão em sintonia com essa proposta, já que, na fabricação dos blocos de solo-cimento não há emissão de gases poluentes, pois o processo de queima é dispensado, e ocorre a incorporação do resíduo do beneficiamento do mármore (calcário), podendo diminuir a quantidade de cimento necessária em sua composição.

Os constituintes fundamentais do cimento Portland contêm, basicamente, uma série de compostos anidros, dentre os quais os principais encontram-se na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Compostos anidros básicos do cimento Portland.

Composto	Constituição	Símbolo
Silicato tricálcico	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Mehta e Monteiro (1994) destacaram a composição potencial em faixas aproximadas dos componentes principais do cimento Portland, como se vê na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Faixas aproximadas da proporção dos principais componentes do cimento Portland.

Componente	Proporção (%)
C <sub>3</sub> S	35% a 65%
C <sub>2</sub> S	10% a 40%
C <sub>3</sub> A	0% a 15%
C <sub>4</sub> AF	5% a 15%

O conhecimento sobre a hidratação do cimento Portland, bem como os produtos formados por ela, é de grande importância para sua aplicação, pois englobam diversos fatores e propriedades que estão diretamente relacionadas aos componentes de suas fases constituintes, que são os seguintes:

- Silicato tricálcico: é o maior responsável pelo ganho de resistência nas idades iniciais, em especial aos 28 dias. Libera em média 40% em massa de hidróxido de cálcio (CH), mais conhecida como Portlandita;
- Silicato dicálcico: é responsável pelo ganho de resistência nas idades mais avançadas, produzindo cerca de 18% em massa de Portlandita;
- Aluminato tricálcico: sua reação é imediata acarretando em um elevado calor de hidratação, por ser responsável pela rigidez da pega. Com a adição de proporções de gesso, o tempo de hidratação é controlado;
- Ferroaluminato tetracálcico: seu desenvolvimento de resistência é lento e baixo, tem pouca influência na pasta endurecida.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), as principais fases geradas pelos produtos de hidratação presentes na pasta de cimento são: o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é produzido pela hidratação do C<sub>3</sub>S e do C<sub>2</sub>S, constitui 50% a 60% do volume de sólidos da pasta, é responsável pela resistência mecânica e durabilidade da matriz de concretos e argamassas; a fase hidróxido de cálcio (CH),

também produzida pela hidratação do  $C_3S$  e do  $C_2S$ , ocupando de 20% a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento e que, devido a sua solubilidade, sua presença gera efeitos desfavoráveis à durabilidade; e os sulfoaluminatos de cálcio, que são produzidos pela hidratação do  $C_3A$  e do  $C_4AF$  na presença do gesso, apresentando de 15% a 20% do volume de sólidos e tem um papel menor na estrutura.

### **2.2.1 Estabilização com cimento Portland**

A estabilização de solos com a adição de complementos como o cimento Portland, é constituída por um processo de tratamento baseado em reações químicas entre o solo, água e materiais adicionados, provocando alterações no solo e originando um novo material com novas características e propriedades necessárias para a utilização deste na construção civil e rural.

Em misturas de solo-cimento, de acordo com o teor de cimento incorporado ao solo, a ação estabilizante do cimento pode ocorrer por dois mecanismos distintos. Um dos mecanismos verifica-se para baixos teores de cimento, ocorrendo uma modificação da fração argilosa do solo que diminui sua plasticidade, podendo acompanhar ou não um ganho de resistência mecânica, uma vez que o cimento forma núcleos independentes na massa do solo. O outro mecanismo possibilita o aumento da resistência mecânica devido a ação aglutinante do aditivo que cimenta as partículas do solo, efeito verificado quando são aplicados teores mais elevados de cimento, em que o cimento forma núcleos interligados distribuídos pela massa do solo (DIAS, 2012).

A agregação do solo-cimento é provocada pela reação do cálcio livre que é liberado durante o processo de hidratação do cimento. Uma das principais características do cimento atuantes na mistura do solo-cimento é a condutividade elétrica das suas partículas. A presença das cargas elétricas contidas no cimento ocasiona uma atração entre as partículas de cimento e as partículas de argila, com isso, produzindo agregados (FERREIRA, 2003). A estabilização do solo ocorre não pela coesão e atrito interno dos componentes, mas sim, principalmente, pela hidratação do cimento.

A estabilização do solo-cimento sob o ponto de vista da utilização do cimento é influenciada por diversos fatores que condicionam as suas propriedades, como o

tipo de solo, presença no solo de materiais nocivos ao cimento, teor de cimento na mistura, teor de umidade na mistura de solo-cimento, processo de compactação, tempo e condições de cura e tipo de água empregada na mistura.

Dias (2012) estudou a influência da quantidade de cimento nas características de resistência e deformabilidade na estabilização de misturas de solo-cimento para utilização principal em construção de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários em Portugal. Constatou que o uso de cimento para estabilização de solos é um método que permite obter consideráveis melhorias na resistência mecânica do solo e, quanto maior a adição de cimento na mistura, maior a resistência obtida.

### **2.3 O setor de rochas ornamentais**

Segundo dados fornecidos pela *XXVII Report Marble and Stones in the World*, em 2015, a produção mundial estimada de rochas ornamentais alcançou a marca de 140,0 milhões de toneladas (Tabela 2.5), colocando a China em primeiro lugar, respondendo por cerca de 32,1% da produção, e o Brasil se posicionando em quarto no ranking mundial com a marca de 5,9% da produção e exportação de rochas ornamentais, dentre elas destacando-se o mármore, o granito, o diorito e o gnaisse. Dados do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (2015) mostram que 30% das reservas medidas (recuperáveis) são da ordem de seis bilhões de m<sup>3</sup> de rochas ornamentais no Brasil.

Os estados do Espírito Santo, Bahia, Ceará e Paraíba são considerados os maiores produtores nacionais, sendo o estado do Espírito Santo o principal pólo de rochas ornamentais do país instalado na região de Cachoeiro do Itapemirim.

Na Figura 2-4 pode-se observar o mapa do estado do Espírito Santo indicando as concentrações de atividades produtivas de rochas ornamentais em torno de uma mesma cadeia.

Tabela2.5: Dados mundiais da produção de rochas ornamentais.

Países	Produção (10 <sup>3</sup> t)			(%)
	2013	2014	2015	
China	39.500,00	42.500,00	45.000,00	32,1
Índia	19.500,00	20.000,00	21.000,00	15,0
Turquia	12.000,00	11.500,00	10.500,00	7,5
Brasil	9.000,00	8.750,00	8.200,00	5,9
Irã	6.500,00	7.000,00	7.500,00	5,4
Itália	7.000,00	6.750,00	6.500,00	4,6
Espanha	5.000,00	4.850,00	4.750,00	3,4
Egito	3.000,00	4.200,00	4.500,00	3,2
Portugal	2.650,00	2.750,00	2.700,00	1,9
Outros países	25.850,00	28.200,00	29.350,00	21,0
Total	130.000,00	136.500,00	140.000,00	100,0

Fonte: XXVII Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo 2016 (XXVII Report Marble and Stones in the World), elaborado pelo Dr. Carlo Montani.

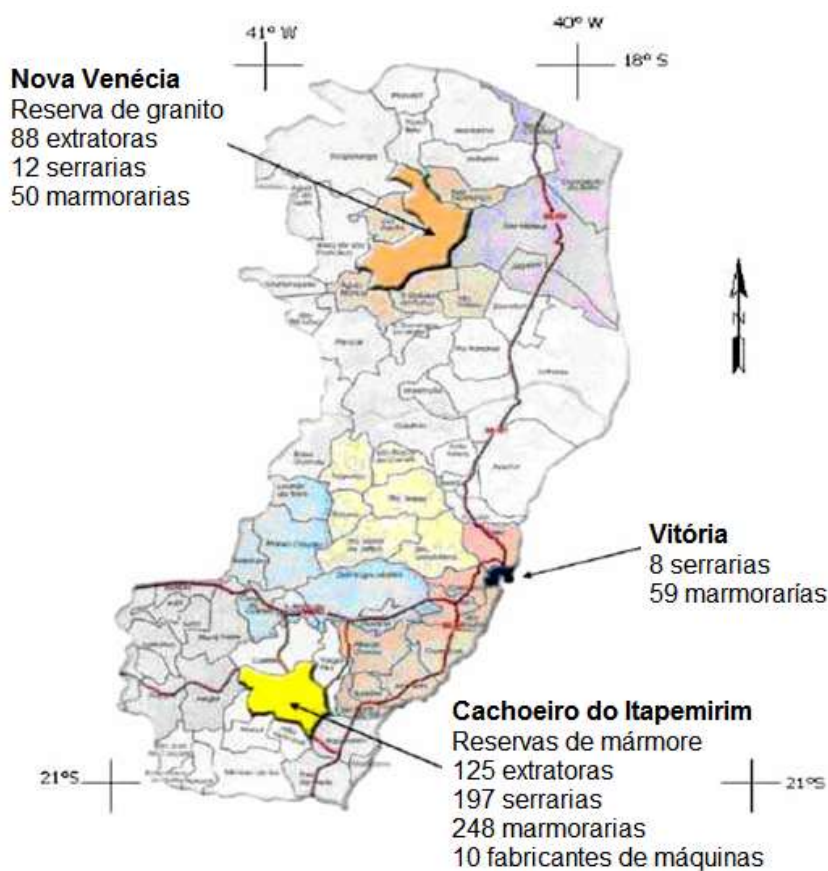


Figura 2-4: Mapa do estado do Espírito Santo com atividades em rochas ornamentais.

Fonte: Adaptado de Spínola (2003).

Segundo dados fornecidos pela ABIROCHAS, no ano de 2016, o município de Cachoeiro do Itapemirim foi responsável por aproximadamente 90% da produção do estado, sendo o setor mineral a principal atividade econômica da região, gerando milhares de empregos diretos e indiretos, cuja produção é capaz de suprir o mercado nacional, tendo ainda grande parte exportada para outros países (Figura 2-5). A relevância desta indústria para o desenvolvimento da região é inquestionável, porém, a extração da matéria prima e sua etapa de beneficiamento podem causar danos ao meio ambiente por falta de atividades de gestão de resíduos.

Na Figura 2-5 está apresentado o gráfico indicativo dos principais estados do Brasil exportadores de rochas ornamentais no ano de 2016.

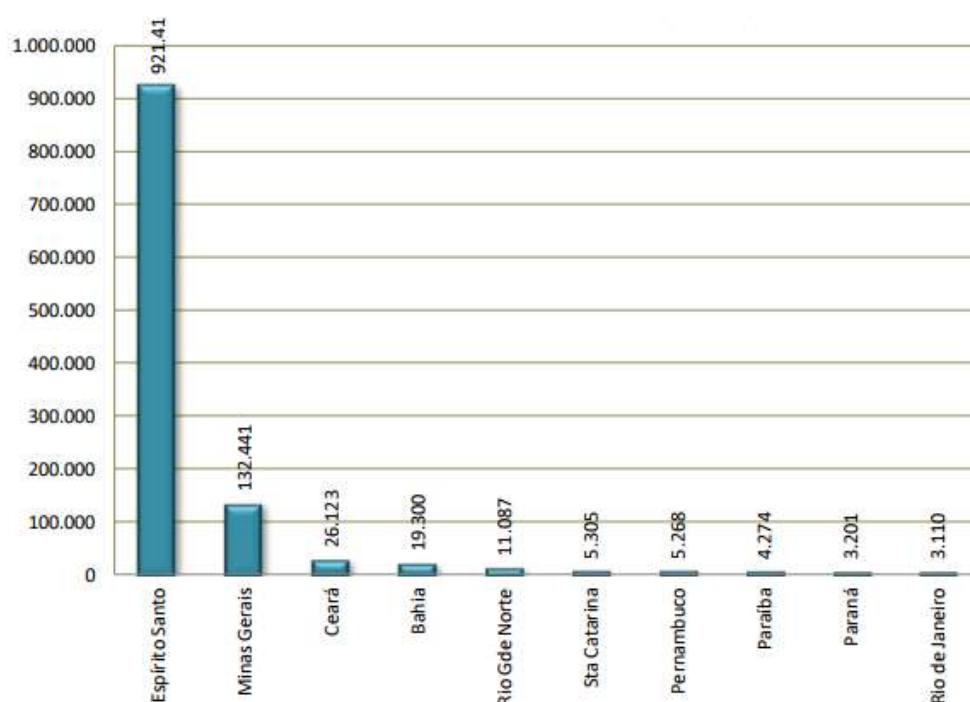


Figura 2-5: Principais estados do Brasil exportadores de rochas ornamentais (US\$ 1.000).

Fonte: ABIROCHAS (2017).

A manipulação das rochas para a utilização na construção civil consiste inicialmente na separação da rocha, serragem para obtenção de blocos e chapas brutas, que é realizada por dois tipos de teares: um deles usa lâmina de aço enquanto o outro usa fios diamantados. Posteriormente, as peças passam por um processo de polimento para obtenção do produto já acabado para a

comercialização. As principais aplicações dos mármore e granitos são: esculturas, tampos e pés de mesas, balcões, lápides, revestimentos internos e externos de paredes, pisos, colunas, soleiras, divisórias, prateleiras, bancadas e revestimentos em geral.

O sistema convencional de corte consiste na utilização das lâminas de aço e é um dos métodos mais utilizados no Brasil. Neste sistema de corte, os teares são constituídos por lâminas por onde circula uma polpa de serragem chamada de “lama abrasiva” que é constituída por granalhas de aço, cal e água (ULIANA *et al.*, 2013).

No momento do corte, ocorre um atrito entre a lâmina, a lama abrasiva e a rocha, levando a uma diminuição e desgaste da granalha, que perde seu poder abrasivo. A lama é descartada gerando um resíduo constituído de pó de rocha, cal e finos metálicos que são provenientes do desgaste das lâminas de corte e das granalhas (ULIANA *et al.*, 2013).

No sistema de serragem utilizando lâminas diamantadas não é necessária a utilização de granalha e cal, usa-se apenas água no processo, portanto o resíduo gerado nesse método é basicamente constituído de pó de rocha e água (ULIANA *et al.*, 2013).

O resíduo utilizado neste trabalho foi gerado através do beneficiamento de blocos de mármore para transformação em chapas pelo processo de serragem utilizando teares de lâminas diamantadas e posterior acabamento e polimento (Figura 2-6). No resíduo estão contidos diversos tipos de mármore com diferentes características.

A utilização desses resíduos como matéria prima para subprodutos úteis na construção civil pode diminuir grandes quantidades de rejeitos que são gerados e depositados em aterros, contribuindo assim para minimização dos impactos ambientais.



Figura 2-6: Processo de geração do resíduo do beneficiamento do mármore: (a) Tear de corte diamantado; (b) Máquina polidora de chapas.

Fonte: Própria.

### 2.3.1 Calcário proveniente do beneficiamento do mármore

Mármore são rochas metamórficas originadas basicamente de calcário, materiais carbonáticos como calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), expostos a altas temperaturas e pressão extrema (ALMEIDA *et al.*, 2015).

O calcário por sua vez é uma rocha formada em grande parte por carbonato de cálcio, podendo ser apresentada na forma de calcita ou aragonita. Na crosta terrestre não existem calcários compostos unicamente de carbonato de cálcio, pois o cálcio muitas vezes é substituído por outros cátions (HOLANDA *et al.*, 1987).

Holanda *et al.* (1987) descreve que os calcários, de acordo com sua origem, podem ser classificados como metamórficos e sedimentares. Nos calcários metamórficos são encontrados com frequência os seguintes minerais: dolomita, silicatos de cálcio (actinolita/tremolita, diopsídio, epidoto), grafite e mica. Os minerais mais frequentemente encontrados nos calcários sedimentares são: dolomita, quartzo, micas e argilominerais.

Almeida *et al.* (2015) caracterizaram o resíduo proveniente do beneficiamento do mármore e afirmou que o mesmo tem como principais constituintes a calcita e a dolomita, como mostrado no difratograma de raios-X obtido (Figura 2-7).



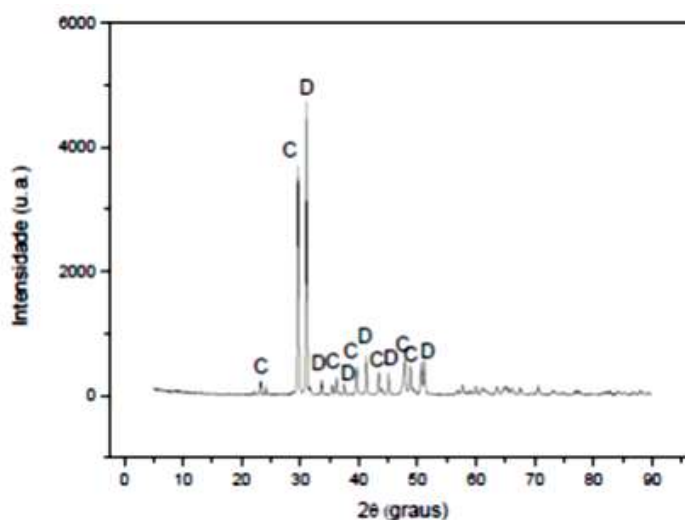


Figura 2-7: Difratoograma de raios-X de uma amostra do resíduo do beneficiamento do mármore.

Fonte: Almeida *et al.* (2015).

São diversas as aplicações dos calcários, que por sua vez são direcionadas através de sua composição física e química. Destacam-se as utilizações como: pedra ornamental, agregado, pedra de construção, meio filtrante, fíler, pó de mineração, nas indústrias de vidro, cerâmica, corretivos de acidez do solo, cimento Portland e cal.

### 2.3.2 Estabilização com adição de resíduo calcário

Neste caso, a estabilização com a utilização de resíduo calcário é abordada pela técnica de estabilização granulométrica que consiste na distribuição de vários grãos de diferentes diâmetros a fim de diminuir os vazios gerados pelos diferentes tamanhos de partículas constituintes do solo, substituindo-as por tamanhos variados alcançando um solo mais homogêneo e com características mais resistentes.

Utilizando o processo de estabilização granulométrica, usualmente são adicionados materiais granulares de modo que se estabilizem os solos que não atendam aos parâmetros geotécnicos (LIMA E MELO, 2014).

Brooks *et al.* (2011) avaliaram a incorporação do pó de calcário para estabilização de dois tipos de solos contendo propriedades geotécnicas inadequadas para sua utilização em pavimentação. Os resultados indicaram que as propriedades mecânicas sofreram melhorias à medida que houve o aumento do teor de estabilizante e mostraram uma redução no peso específico aparente seco e

aumento do teor de umidade ótima.

Lima e Melo (2014) estudaram a viabilidade de se estabilizar um determinado tipo de solo natural com características inadequadas para ser utilizado em camadas granulares de pavimentos adicionando agregados finos de rochas calcárias, nas proporções 10%, 20% e 30% tendo notada melhoria das propriedades mecânicas do solo com o aumento do teor do corretivo.

### **2.3.3 Utilização do resíduo calcário como subproduto na construção civil**

No processo de beneficiamento do mármore, o pó de pedra calcária gerado como resíduo é apresentado como um agregado miúdo; suas características físicas, químicas, mecânicas e mineralógicas viabilizam sua utilização como subproduto na construção civil.

Moura e Leite (2011) estudaram a viabilidade do uso de resíduos de serragem de rochas ornamentais (granito e mármore) para a produção de blocos pré-moldados para alvenaria de vedação como substituinte parcial para o cimento em teores de 5, 10 e 15% em massa. Os blocos foram avaliados por meio da resistência à compressão simples e absorção de água. Constatou que, os blocos fabricados com 5 e 10% de substituintes alcançaram maior média de resistência à compressão. Já os resultados de absorção de água atenderam aos limites exigidos pela norma. Tais resultados mostram que a substituição de até 10% da massa de cimento pelos resíduos é viável, além de ambientalmente favorável.

Santos (2012) substituiu toda a areia lavada de uma argamassa em diversos traços pelo resíduo do beneficiamento do mármore e percebeu a diminuição do teor de cimento no traço, bem como, o aumento da resistência à compressão axial e da massa específica.

Sales *et al.* (2014) estudaram a viabilidade do uso do pó de mármore como substituinte parcial de agregados naturais na produção de argamassas utilizadas para revestimento e assentamento em alvenarias. Tal estudo demonstrou que a substituição de 20% do agregado pelo pó gerou uma redução na absorção e no índice de vazios, porém com a elevação deste teor, ocorreu um aumento na porosidade da argamassa endurecida. De forma geral, a adição do substituinte gerou uma maior mobilidade e coesão das argamassas. Além disso, nos ensaios de

resistência foi constatado um aumento desta a partir do menor teor de substituição.

Segundo Kumayama *et al.* (2014), o resíduo do mármore se mostrou eficaz para a utilização na produção de concreto auto adensável, considerando-se os resultados de validação no estado fresco.

Alves (2014) afirmou que o resíduo do mármore em uma adição de até 40% se mostrou viável para a confecção de blocos de solo cimento, considerando que os valores de resistência e de absorção de água atenderam aos requisitos normativos.

Filho *et al.* (2015) avaliaram o uso de fíler calcário em substituição parcial ao cimento Portland CP V-ARI, no teor de 10%, e aferiram as alterações microestruturais e de porosidade provocadas por tal adição na matriz hidratada, constatando que tal substituinte possibilitou a redução da expansão de barras de argamassa de cimento Portland resultante de ensaio acelerado de exposição à solução de sulfato de sódio conforme a NBR 13583 (ABNT, 2014).

Segundo Sutcu *et al.* (2015), a utilização do resíduo de mármore incorporado em tijolo cerâmico em uma adição de até 30%, apresentou resultados de resistência à compressão individual de 8,2 MPa. O trabalho faz uma indicação quanto ao uso do produto para construções que necessitam de isolamento de calor, tendo em vista que o resíduo do mármore faz com que a condutividade térmica do tijolo tenha um menor valor, comparado ao tijolo convencional.

## **2.4 Solo-cimento**

O solo-cimento é o produto obtido pela mistura íntima de solo, cimento e água, que submetido à compactação em umidade ótima e através de reações de hidratação do cimento, adquire propriedades mecânicas aprimoradas como resistência e durabilidade (ABCP, 1986). Segundo Enteiche (1963) *apud* Mercado (1990), o solo-cimento é tratado como um processo físico-químico de estabilização, decorrente de consequências geradas de uma estruturação que é resultado de uma reorientação das partículas sólidas do solo com a deposição de substâncias de cimentação em contatos intergranulares, ocasionando uma alteração das quantidades relativas de cada uma das três fases que constituem o solo – sólidos, água e ar.

Segundo Abiko (1983), no ano de 1915 o solo-cimento foi empregado pela primeira vez nos EUA pelo Engenheiro Bert Reno, que utilizou em sua mistura, conchas marinhas, areia de praia e cimento Portland para pavimentar uma rua, porém, só em 1935 a PCA iniciou estudos e pesquisas tecnológicas sobre esse material.

O interesse pela utilização da prática do solo-cimento no Brasil, segundo Grande (2003), surgiu em 1936 após a regulamentação do seu uso pela ABCP, sendo utilizado inicialmente em bases e sub-bases de pavimentos de estradas e, a partir de então, o solo-cimento começou a ser empregado em diversos setores da construção civil tais como: camadas de fundações, bases para pavimentos rígidos e flexíveis, estradas, revestimentos de canais, reservatórios, barragens de terra, diques, estabilização de taludes, muros de arrimo, alvenarias de tijolos, blocos prensados, painéis e paredes monolíticas para construção de moradias.

Na década de 70, o solo-cimento foi alvo de intensas pesquisas, principalmente pela ABCP, pelo CEPED e também pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. A primeira obra realizada no Brasil com a utilização da prática do solo-cimento foi no ano de 1945, em que foi construída uma casa de bombas que abastecia o aeroporto de Santarém no Pará. Desde então, a utilização do solo-cimento foi sendo ampliada para diversos setores da construção civil do país, como pavimentação de estradas, revestimentos de barragens de terra, fabricação de blocos e demais aplicações.

#### **2.4.1 Fatores que condicionam a qualidade de mistura solo-cimento**

Os principais fatores que interferem na qualidade do solo-cimento são: tipo de solo, teor de cimento, método de mistura e compactação. Dentre esses fatores, o solo exerce maior influência, portanto, se o solo for inadequado para utilização na mistura do solo-cimento, pouco poderá ser feito para que se obtenha um produto satisfatório, embora teoricamente qualquer tipo de solo possa ser estabilizado com cimento.

Limitações econômicas e vinculadas a trabalhabilidade definem faixas de solos estabilizáveis. A *Highway Research Board Of America – HRB* (1961) estipula limites para solos poderem ser estabilizados com cimento e se tornarem

economicamente vantajosos através de sua distribuição granulométrica. É destacado que a fração fina do solo deve ser de, no máximo, 50%, pois a resistência inicial do solo-cimento é devido à coesão da fração fina compactada. Estudos têm demonstrado que solos contendo teores de silte e argila inferiores a 20%, não conseguem uma resistência inicial que favoreça a sua compactação.

Segantini (2000) *apud* Góis (2012), destaca que os solos arenosos, devido a sua fração granulométrica, são considerados os mais adequados para a utilização na mistura solo-cimento, pois neles estão contidos grãos de areia grossa e pedregulhos que são benéficos, em se tratando de matérias inertes que exercem a função de enchimento. Isso beneficia a liberação de maiores proporções de cimento para se aglomerarem aos grãos menores.

Fatores como o teor de matéria orgânica contida no solo influenciam diretamente nas propriedades do solo-cimento. Blücher (1951) relata que o teor de matéria orgânica contida no solo deve ser suficientemente baixo, considerando um limite de segurança de 2%, porém existem casos relatados de experimentos bem-sucedidos com a utilização de solos contendo teores de até 5% de matéria orgânica e experiências insatisfatórias com solos contendo 0,5%.

Após uma série de estudos e ensaios realizados com diversos tipos de solos, diferentes autores como Rocha (1996), Silva (1991) e Moura (1987), concordaram que o aumento do teor de cimento na mistura do solo-cimento propicia um aumento da resistência à compressão e, como resultado, maior durabilidade, independente do tipo de solo empregado. Porém, teores de cimento muito elevados e condições de cura inadequadas, possibilitam o aparecimento de fissuras no material, produzidas pela retração por secagem (INGLES E METCALF, 1972; SABBAG, 1980; PITTA, 1982).

Análogo à tecnologia dos concretos, a cura é um fator de fundamental importância na qualidade do solo-cimento. Rocha (1996) avaliou a resistência mecânica do solo-cimento submetido a vários efeitos de processos e dos tempos de cura.

Existe uma série de parâmetros e variáveis que devem ser bem esclarecidas sobre a metodologia de mistura do solo-cimento. Segundo Blücher (1951), misturas realizadas em laboratório apresentam resistências e durabilidade maiores que as

misturas similares efetuadas no campo. Variáveis como: eficiência dos equipamentos empregados e condições ambientais do local onde será realizada a mistura podem influenciar diretamente na resistência à compressão do material, podendo diminuí-la em até 50%. Baker (1954) e Grimer (1957) relatam que existe uma relação entre resistência mecânica e homogeneização da mistura. Felt (1955) *apud* Rocha (1996) apontou que, quanto maior for o tempo de mistura do solo-cimento, menor será sua resistência mecânica.

A compactação correta do solo-cimento é um fator essencial para obtenção de um produto satisfatório. Os parâmetros de compactação da mistura estão diretamente ligados ao teor de umidade. Blücher (1951) afirma que a relação água/cimento na estabilização do solo-cimento exerce pequeno valor quando comparada ao conceito e aplicação no concreto. Poço e Bonassi (1988) *apud* Rocha (1996) e Minke (1998) *apud* Silva (2001) afirmam que a resistência à compressão é proporcional ao grau de compactação, independente do teor de cimento empregado.

Segundo Silveira (1966), uma redução na massa específica seca do solo-cimento de apenas 5% propicia uma redução de 15% na resistência mecânica contendo o mesmo teor de cimento. Em caso de solos arenosos, quando a umidade da mistura está um pouco abaixo da umidade considerada ótima, estes podem alcançar maior resistência, contudo a durabilidade do material pode ser afetada.

Segundo Cancian (2013), a umidade ótima obtida nos ensaios de compactação é suficiente à hidratação do cimento, porém, para tal efeito, o processo de execução deve garantir a homogeneização da mistura para que todo grão de cimento possa entrar em contato com a água, proporcionando melhor desempenho.

Santiago *et al.* (2012) estudaram a relação água/cimento ideal para quatro composições na produção de blocos de solo-cimento com diferentes adições de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais. Foram realizados ensaios variando-se a relação água/cimento em 0,72 / 0,86 / 1,00 (três para cada traço) em 7 / 28 / 60 dias, e que de acordo com os ensaios as maiores resistências à compressão simples ocorreram com a relação água/cimento de 0,86.

### 2.4.2 Métodos de dosagens da mistura solo-cimento

A ABCP determinou na Norma Geral de Dosagem uma sequência de ensaios necessários para garantir à mistura de solo-cimento melhoria nas suas características. Tais análises podem ser realizadas através de ensaios de durabilidade ou de resistência à compressão em laboratório, seguidos de uma interpretação por meio de critérios adquiridos na experiência. Os resultados esperados do estudo de dosagens são fixados em três quesitos básicos:

- O teor de cimento da mistura;
- A umidade ótima da mistura;
- Massa específica desejada.

A ABCP resume as dosagens nas seguintes operações: identificação e classificação do solo; escolha do teor de cimento para realizar o ensaio de compactação; ensaio de compactação do solo-cimento; escolha dos teores de cimento para realização do ensaio de durabilidade; moldagem de corpos de prova para realização do ensaio de durabilidade; ensaio de durabilidade por molhagem e secagem; escolha do teor de cimento adequado em função dos resultados do ensaio.

Os métodos de dosagens da ABCP são baseados em experiências da *PCA* (1946), sendo eles:

- *Norma Geral*: que é aplicável a qualquer tipo de solo, exceto os solos orgânicos. Seu critério é estipulado através da análise dos corpos de provas submetidos aos ensaios de durabilidade por molhagem e secagem durante 12 ciclos;
- *Norma Simplificada*: que é aplicável a tipos de solos com textura granular predominante, ou seja, solos que contenham no máximo 50% de material com diâmetro menor que 0,05 mm (fração silte mais argila) e 20% de material com diâmetro 0,005 mm (fração argila). Todo critério é baseado no ensaio de resistência à compressão da mistura, após sete dias.

Métodos comparativos de dosagens foram estudados por Ferraz *et al.* (2001) utilizando algumas amostras de solos, tendo verificado que os teores de cimentos

encontrados pela Norma Geral são superiores aos demais métodos. Vale ressaltar que, a metodologia de dosagem da mistura, por mais rigorosa que seja, pode levar a resultados diferentes e alterados devido a uma série de fatores intervenientes como: teor de umidade, mistura, compactação, tempo e condição de cura.

Em resumo, a obtenção do teor de cimento ideal na mistura do solo-cimento se baseia em análises de comportamentos de corpos-de-prova ensaiados e diferentes entre si em até 2%. Essa metodologia simplificada proporciona economia de tempo na tomada de decisões sobre qual seria a ideal e efetiva composição a ser empregada em um determinado caso específico.

Para a execução de tijolos, blocos, paredes monolíticas e construção de alvenaria, o solo-cimento está condicionado a seguir especificações regidas por normas de valores mínimos de resistência à compressão e valores máximos de absorção de água.

### **2.4.3 Bloco de solo-cimento**

Segundo a ABCP (1985) *apud* Amaral (2016), o bloco de solo-cimento é um produto cimentício resultante da mistura homogênea de solo, cimento Portland, água e eventuais aditivos, em suas devidas proporções e adequadamente compactados. O produto final deve se enquadrar e atender aos requisitos técnicos exigidos pela NBR 10834 (ABNT, 2013).

Pelo baixo custo de produção e suas propriedades tecnológicas, o bloco de solo-cimento começou a ser aplicado no Brasil em construções de moradias por volta do ano de 1978. Um dos motivos que levou à ampliação da utilização deste material foi a aprovação técnica para construção de habitações populares concedida pelo antigo BNH. Os estudos que comprovaram a eficácia do produto e seu bom desempenho termoacústico foram realizados pelo IPT e pelo CEPED que também comprovaram que sua aplicação gerava uma redução nos custos de 20 a 40%, se comparado com a alvenaria tradicional de cerâmica vermelha (FIQUEROLA, 2004).

Na Figura 2-8 têm-se blocos de encaixe de solo-cimento vazado.





Figura 2-8: Blocos de solo-cimento.

Fonte: Própria.

A produção de blocos de solo-cimento dispensa o processo de queima e evita emissões de gases poluentes causadores do efeito estufa no ambiente e o desmatamento, por isso é considerado um produto ecológico. Segundo Fiquerola (2004), a fabricação de mil unidades de blocos tradicionais que utilizam o processo de queima consome cerca de 120 kg de combustível (óleo) ou, em média, cinco árvores de médio porte.

O cimento Portland é um dos principais componentes do tijolo ecológico e em sua fabricação ocorre um grande consumo energético, o que gera implicações ambientais. Porém, em analogia à fabricação (queima) de blocos cerâmicos convencionais, a energia gasta é consideravelmente inferior, pois o cimento é usado em pequenas proporções no conjunto do bloco solo-cimento (PISANI, 2004). Vale acentuar que existem possibilidades de se obter reduções do cimento Portland na mistura com a adição de determinados resíduos que não interfiram negativamente nas propriedades mecânicas e nos resultados finais do produto desejado.

Oliveira *et al.* (2014) incorporaram em tijolos de solo-cimento o resíduo proveniente de tornearias mecânicas em proporções de 10% e 15% de resíduo em substituição do agregado, ficando o teor de cimento na mistura em 10%. Foram verificados os parâmetros de resistência à compressão simples e absorção de água. Foi observado que a adição de 15% do resíduo proporcionou melhorias nas suas características físico-mecânicas, indicando o uso do resíduo na fabricação de tijolos de solo-cimento.

Siqueira e Holanda (2015) avaliaram a influência da adição do resíduo produzido pela indústria de papel e celulose sobre o comportamento de densificação de tijolos de solo-cimento, verificando que o resíduo é rico em calcita e que há a viabilidade da incorporação de até 20% de resíduo em substituição parcial do cimento, apresentando aspectos importantes nos parâmetros de resistência mecânica e durabilidade.

Conforme estudo realizado por Castro *et al.* (2016), no intuito de reciclar os coprodutos gerados pelas empresas siderúrgicas como a escória granulada de forno elétrico a arco, poeiras de despoeiramento de aciaria elétrica e o pó de baião, foi realizada a substituição parcial dos subprodutos siderúrgicos em dosagens de até 20% em substituição parcial do solo na produção de blocos intertravados de solo-cimento. Foram avaliados o desempenho dos blocos nos parâmetros de resistência mecânica e absorção de água. Verificou-se que os valores atenderam aos padrões exigidos por norma e com isso trazendo mais uma opção para valorização dos resíduos.

Amaral (2016) ressalta que os blocos de solo-cimento podem ser utilizados sem a necessidade de revestimentos, chapisco, reboco e emboço, diminuindo assim o desperdício de matérias-primas. A geometria de encaixes sobrepostos no assentamento e a furação permitem a passagem de dutos para as instalações elétricas e hidráulicas, facilitando a execução e poupando o volume de entulho gerado pelos rasgos que seriam feitos nas paredes.

A crescente preocupação com a preservação ambiental juntamente às limitações dos recursos naturais, a busca por arquiteturas sustentáveis, a possibilidade de utilização de resíduos, a redução dos custos de produção, além de diversos outros fatores, torna o bloco de solo-cimento um produto cada vez mais atraente aos olhos da indústria da construção civil.

As figuras 2-9 (a) e (b) apresentam alguns tipos de construções residenciais multifamiliares executadas com blocos de solo-cimento.



Figura 2-9: Construções em blocos de encaixe de solo-cimento: (a) Casa em alto padrão; (b) Fachada residencial.

Fonte: [www.ecomaquinas.com.br](http://www.ecomaquinas.com.br)

#### 2.4.4 Propriedades tecnológicas do bloco de solo-cimento

O bloco de solo-cimento apresenta certas características que são atrativas para o aumento do seu emprego na indústria da construção civil, sendo elas usualmente:

- Boa resistência à compressão;
- Baixa capacidade de absorção de água;
- Baixa variação volumétrica;
- Alta durabilidade;
- Bom isolamento termoacústico;
- Incombustibilidade.

É consenso que a qualidade do bloco de solo-cimento está diretamente relacionada primordialmente à seleção da matéria-prima, ou seja, o solo e sua estabilização. Faria (1990) descreve uma série de patologias que são comuns após a estabilização do solo:

- Retração, aparecimentos de fissuras, variações volumétricas por reações de água com aditivos;
- Degradação do produto devido à presença de matéria orgânica, sais

solúveis em água, materiais expansivos ou partículas friáveis (feldspatos e micas);

- Propriedades heterogêneas na série de produção, ocasionado pela descontinuidade das características da matéria-prima.

A qualidade do bloco de solo-cimento é função dos grãos do solo após o processo de compactação. O resultado após ser compactado apresenta características como baixa porosidade e alta densidade. A escolha do equipamento para moldagem do produto desempenha um papel fundamental, pois é ele que condiciona a taxa de compactação do material, conforme estudado por Faria (1990).

A Tabela 2.6 apresenta de forma resumida uma comparação das características de diversas prensas existentes no mercado (FERRAZ JUNIOR, 1995).

Tabela 2.6: Comparativo de prensas para componentes de solo estabilizado.

Tipo de prensa		Energia de compactação (MPa)	Produção tijolos/dia
Manual	Mecânica	1,5 - 2,0	300 a 1200
	Hidráulica	2,0 - 10,0	2000 a 2800
Motorizada	Mecânica	4,0 - 24,0	1600 a 12000
	Hidráulica	> 20,0	-

O processo de moldagem dos blocos de solo-cimento possibilita uma maior regularidade nas dimensões de cada face, implicando num menor consumo de argamassa para realização do assentamento e revestimento, caso haja necessidade dos mesmos, pois sua moldagem propicia um design diferenciado de outros tipos de blocos, conforme descrito por Assis (1995).

O processo de fabricação do bloco de solo-cimento corresponde a uma série de etapas definidas:

1. Preparação do solo: Consiste no destorroamento e peneiramento do solo seco;
2. Preparação da mistura: Adição do cimento Portland, mistura e homogeneização dos materiais. Após a homogeneização, adiciona-se água e novamente mistura-se até a uniformização da umidade;

3. Moldagem dos blocos;

4. Cura e armazenamento: Após o período de seis horas de moldados e durante os sete primeiros dias, os blocos devem ser mantidos úmidos por meio de molhagens, pois a cura envolve uma combinação de fatores que influenciam na hidratação do cimento, consistindo no controle do tempo, condições de umidade e temperatura.

A ABCP (1988) recomenda que a quantidade de material para confecção dos blocos deve ser compatível para uma produção correspondente a uma hora de funcionamento da prensa.

Os solos adequados para a fabricação de alvenarias segundo a NBR 10833 (ABNT, 2013) são os que possuem as características apresentadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Critérios para seleção de solos.

<b>Características</b>	<b>Requisitos (%)</b>
% passando na peneira ABNT 4,8 mm (nº 4)	100
% passando na peneira ABNT 0,075 mm (nº 200)	10 a 50
Limite de Liquidez	≤ 45
Limite de Plasticidade	≤ 18

Sobre a dosagem, a ABCP (1988) recomenda a moldagem nos traços 1:10, 1:12, 1:14, porém, a escolha do “traço adequado” deve ser obtida por meio de ensaios que apresentem os resultados com o menor consumo de cimento atendendo a todos os critérios estabelecidos por norma. A Tabela 2.8 apresenta os limites especificados para controle de qualidade dos blocos definidos na NBR 8491 (ABNT, 2012).

Tabela 2.8: Limites para controle de qualidade dos blocos de solo-cimento.

<b>Características</b>	<b>N.º de amostras</b>	<b>Exigências NBR 8491 (ABNT, 2012)</b>	
Variação dimensional	-	± 3mm	
Resistência à compressão	10	Valor médio	≥ 2,0 MPa
		Valor individual	≥ 1,7 MPa
Absorção de água	3	Valor médio	≤ 20%
		Valor individual	≤ 22%

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

No que se refere ao estudo para a produção dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário, foram utilizadas as matérias-primas: solo, resíduo calcário, cimento Portland e água, descritos adiante.

##### 3.1.1 Solo

O solo que foi utilizado como agregado miúdo nos experimentos foi cedido pela empresa Artecerâmica Sardinha, que é proveniente de uma jazida localizada no distrito de Poço Gordo, interior do município de Campos dos Goytacazes – RJ.

Após coletado (Figura 3-1) o solo foi levado ao LECIV, para secagem ao ar livre em local com ausência de contaminantes. Após o processo de secagem, o solo foi triturado e passado em peneira nº 8 (2,34 mm de abertura). Após esse procedimento, as amostras foram condicionadas em sacos plásticos para evitar o ganho de umidade. A determinação da umidade do solo foi obtida através da realização da média de seis amostras pelo processo de secagem em estufa.



(a)



(b)

Figura 3-1: Processo de tratamento do solo: (a) Peneiramento do solo; (b) Solo pronto para utilização.

Fonte: Própria.

### 3.1.2 Calcário

As amostras do resíduo calcário proveniente do beneficiamento do mármore utilizadas na mistura foram coletadas na base da empresa Polita Mármore localizada na Rodovia Gumercindo Moura, km 9, Santa Rosa - município de Cachoeiro do Itapemirim – ES.

O resíduo foi coletado em forma de lama, após passar pelo processo de decantação e filtragem em filtro prensa, equipamento utilizado para retirada do excesso de água da lama reutilizando-a para o processo do corte e beneficiamento das rochas. A umidade do resíduo após o processo de prensagem no filtro-prensa é da ordem de 30%, sendo então armazenado para disposição final em aterro especializado. A empresa estima a produção mensal de 150,0 m<sup>3</sup> de resíduo gerados.

Após a coleta do material, as amostras foram levadas ao Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) localizado na UENF e inicialmente secas ao ar livre em local com ausência de contaminantes. Após o processo de secagem, as amostras passaram pelo destorroamento em triturador para a retirada dos grumos de pó. Em seguida foram condicionadas em sacos plásticos para evitar o ganho de umidade. A determinação da umidade do material antes da sua aplicação foi obtida através da realização da média de seis amostras pelo processo de secagem em estufa.

As figuras 3-2 (a) e (b) mostram o processo em conjunto dos reservatórios utilizados para o processo de decantação do resíduo e armazenamento da água utilizada no corte das rochas e o filtro prensa. As figuras 3-2 (c) e (d) apresentam o armazenamento do resíduo após o processo de prensagem para disposição final sendo transportados em caminhões basculantes para aterro.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3-2: Logística de separação do resíduo do beneficiamento do mármore: (a) Reservatórios de água e resíduo; (b) Filtro prensa; (c) Armazenamento de resíduo; (d) Carga de resíduo para destinação final.

Fonte: Própria.

As figuras 3-3 (a) e (b) ilustram o processo de secagem ao ar livre e o armazenamento final do resíduo pronto para utilização, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 3-3: Secagem e armazenamento do resíduo do beneficiamento do mármore: (a) Secagem ao ar livre; (b) Armazenamento.

Fonte: Própria.



### 3.1.3 Cimento

O cimento Portland utilizado foi o CP V-ARI, marca Itambé, que apresenta características físicas, químicas e mecânicas compatíveis para a fabricação de blocos de solo-cimento, estando enquadrado nos requisitos especificados pela NBR 5733 (ABNT, 1991). As especificações do cimento Portland CP V-ARI foram fornecidas pela fabricante e podem ser verificadas no Apêndice A. Sua escolha foi devido às suas características, por se tratar de um cimento comercial com maior pureza, sem adição de escória de alto-forno e pozolonas e principalmente quanto ao ganho de resistência inicial, o que permitiu uma melhor logística de transporte dos blocos, uma vez que os blocos foram conformados na empresa Artecerâmica Sardinha e foram imediatamente transportados para o LECIV para o processo de cura em câmara úmida.

A Figura 3-4 ilustra os blocos recém conformados envolvidos em plástico para preservação de sua umidade sendo transportados.



Figura 3-4: Transporte dos blocos recém conformados.

Fonte: Própria.

### 3.1.4 Água

Para a realização dos experimentos foi utilizada água potável, coletada na rede de distribuição de águas da cidade de Campos dos Goytacazes – RJ, proveniente da Concessionária Águas do Paraíba.

## 3.2 Métodos

O estudo experimental foi realizado de modo a possibilitar a fabricação em

escala de blocos prensados de encaixe de solo-cimento com a adição do resíduo calcário do beneficiamento do mármore, avaliando assim, suas propriedades físico-mecânicas.

A metodologia de pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas:

- 1) Realização dos ensaios de caracterização física, química e mineralógica do solo e do resíduo calcário.
- 2) Definição da composição da mistura solo-cimento, calcário e água para moldagem dos corpos-de-prova.
- 3) Confeção dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário.
- 4) Realização dos ensaios de massa específica, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade por molhagem e secagem.

As figuras 3-5 e 3-6 ilustram os procedimentos experimentais realizados neste trabalho.

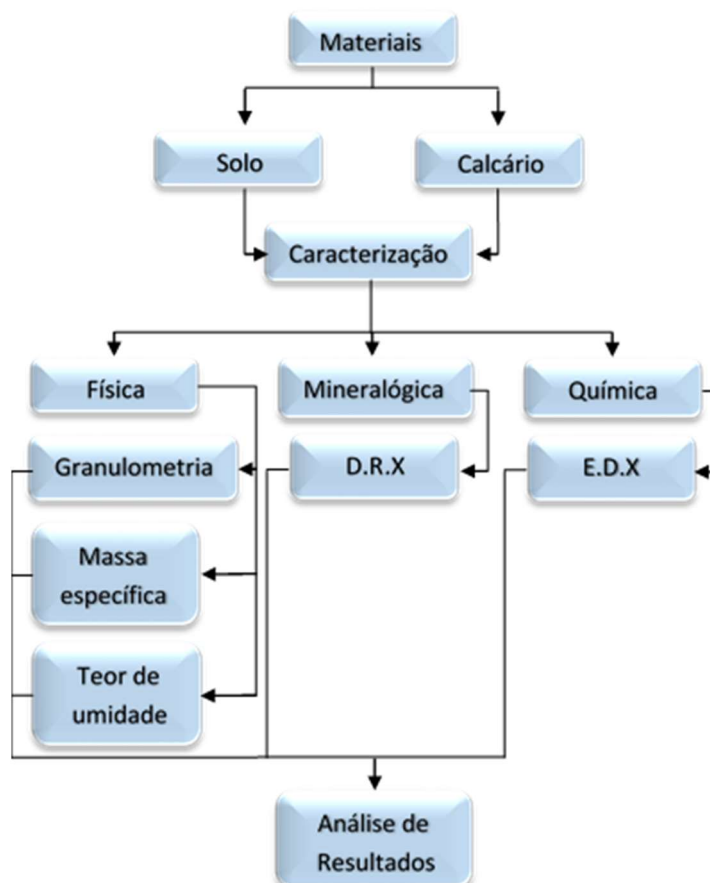


Figura 3-5: Fluxograma da caracterização das matérias primas.

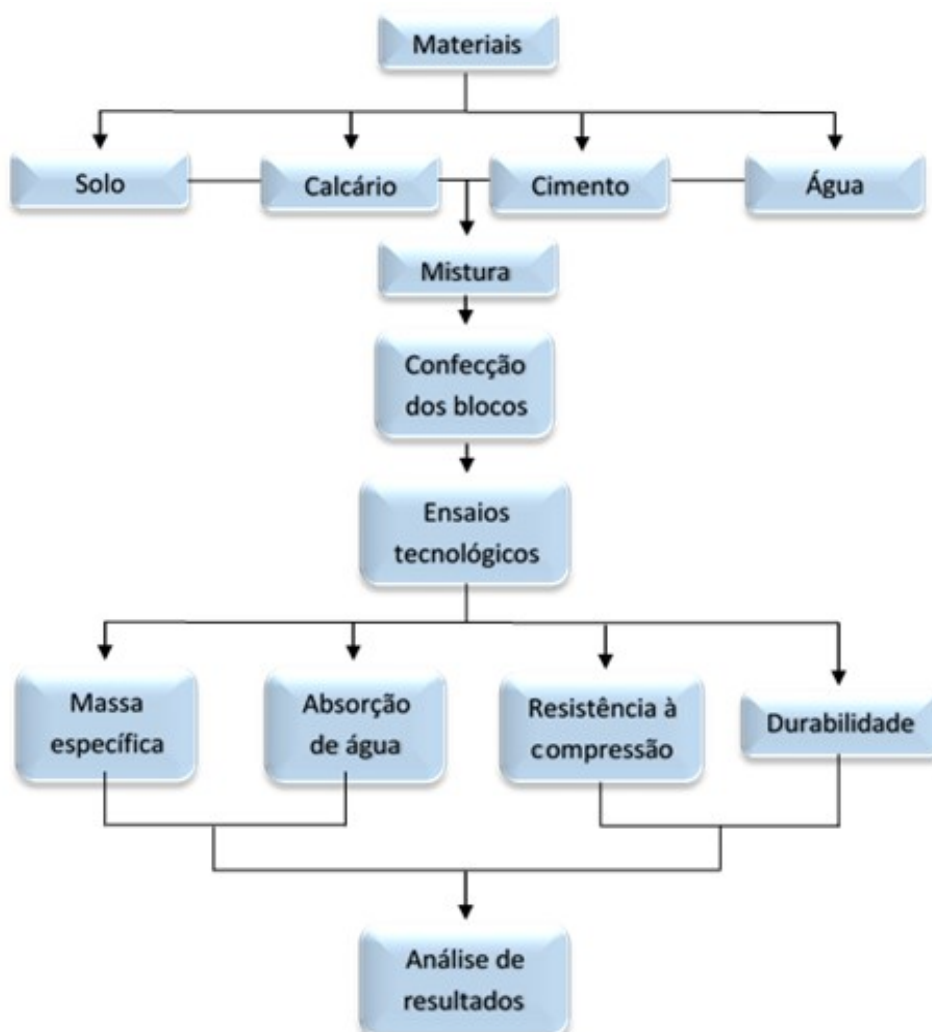


Figura 3-6: Fluxograma da execução dos corpos-de-prova e ensaios.

### 3.2.1 Caracterização das matérias primas

#### 3.2.1.1 Caracterização física

A caracterização física das amostras compreende os ensaios de: massa específica, teor de umidade e granulometria, que foram realizados no LECIV/UENF.

##### a) Granulometria

A distribuição dos tamanhos das partículas das amostras de solo e resíduo calcário foi realizada de acordo com os procedimentos de peneiramento e sedimentação da NBR 7181 (ABNT, 2017).

Os limites de Atterberg, que determinam as propriedades plásticas (Limite de Liquidez, Limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade) foram obtidos em conformidade com a NBR 6459 (ABNT, 2017) e NBR 7180 (ABNT, 2016). Essas análises são importantes porque indicam as condições de trabalhabilidade de um determinado tipo de solo. O Limite de Plasticidade (LP) determina a quantidade mínima de água para que o estado plástico seja atingido. Já o Limite de Liquidez (LL) determina a quantidade mínima de água para que o material atinja uma consistência de lama (SIQUEIRA, 2013).

Para a obtenção do Índice de Plasticidade de Atterberg (IP) da amostra analisada foi utilizada a expressão:

$$IP (\%) = LL - LP \quad (\text{Eq. 3.1})$$

em que:

IP é o Limite de Plasticidade (%);

LL é o Limite de Liquidez (%);

LP é o Limite de Plasticidade (%).

### **b) Massa específica real dos grãos**

Para a determinação da massa específica real dos grãos, as amostras do solo e do resíduo calcário foram submetidas aos ensaios em conformidade com as normas NBR 6457 (ABNT, 2016) e NBR 6508 (ABNT, 2008).

### **c) Teor de umidade**

Proctor publicou em 1933 uma série de artigos que discorriam sobre diversas metodologias de compactação. Ele percebeu que a densidade de um solo compactado está em função do teor de umidade no momento em que ocorre a compactação. Explicou que a energia de compactação constante com a adição de volumes de água ao solo, aumentava a densidade aparente até um determinado ponto, chamado de “umidade ótima”, contudo ao se acrescentar volumes de água acima do considerado ótimo, observou-se uma redução da densidade, pois o excesso de água tende a absorver parte da energia de compactação gerando, com isso, uma redistribuição dessa energia de compactação ao sistema, afastando as

partículas sólidas.

Muitos autores utilizam métodos empíricos para obtenção do teor de umidade na mistura de solo-cimento, sem um devido controle tecnológico e avaliação das influências do teor de umidade nas propriedades dos blocos prensados. Atualmente, o método mais utilizado para a obtenção da umidade ótima de moldagem na confecção de blocos de solo-cimento prensados é o ensaio de compactação Proctor Normal prescrito na NBR 12023 (ABNT, 2012). Junior (2001) utilizou a metodologia de compactação Proctor Normal para obtenção do teor ótimo de umidade de moldagem para a fabricação de blocos de solo-cimento e pó de pedra calcária e os resultados mostraram que os valores de umidade obtidos no ensaio de compactação não se aplicavam à execução, impossibilitando a conformação dos corpos-de-prova, contudo, indicou que os valores obtidos serviram como um ponto de referência para encontrar a umidade de moldagem obtida empiricamente.

A obtenção dos dados no ensaio de compactação (Proctor Normal) estão em função de uma compressão dinâmica exercida por um soquete, no entanto, na produção de blocos de encaixe prensados, a compactação é praticamente estática, sendo exercida por uma prensa, sendo ela mecânica ou hidráulica.

Vale ressaltar, também, que o teor de umidade em uma mistura de solo-cimento é tão importante quanto a porcentagem de cimento empregada na mistura, pois a resistência mecânica do bloco está em função da hidratação do cimento, deste modo, a umidade de moldagem deve ser suficiente para que ocorra toda a hidratação do cimento. Apesar das diversas aplicações, ainda não existem metodologias de dosagem para aplicação em solo-cimento baseadas em critérios racionais, como são encontradas para aplicação em concreto, no qual o fator água/cimento desempenha um papel fundamental nos parâmetros de resistência mecânica desejada.

A mistura de solo-cimento apresenta um complexo comportamento mecânico, que é influenciado por inúmeros fatores, sendo um dos principais a heterogeneidade do solo e suas propriedades físicas e químicas, o teor de água e cimento na mistura.

Tendo em vista a diferença entre a compactação dinâmica e estática, o teor de umidade na mistura de solo-cimento estar relacionado a resistência mecânica, além da evidência de resultados insatisfatórios na utilização do método de

compactação Proctor Normal para obtenção da umidade ótima de moldagem de blocos prensados, foi adotada uma metodologia experimental de compactação estática para a determinação da umidade ótima de moldagem.

A metodologia aplicada visou obter o teor de umidade ótimo de moldagem em função da massa específica aparente seca, utilizando o processo de compactação estática (prensagem), investigando a relação entre a variação de umidade, massa específica aparente seca e resistência à compressão uniaxial.

Para viabilizar a metodologia adotada, adicionou-se o ensaio de compactação Proctor Normal para solo-cimento segundo a NBR 12023 (ABNT, 2012) – método A, que serviu como parâmetro de comparação entre os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca, obtidos no processo de compactação experimental para cada uma das misturas estudadas neste trabalho.

O processo de execução do ensaio de compactação estática seguiu a seguinte metodologia:

- a) Realização do ensaio de compactação Proctor Normal seguindo as orientações da NBR 12023 (ABNT, 2012) – método A: O ensaio foi realizado para cada um dos traços estudados para a obtenção da curva de compactação;
- b) Separação dos materiais para realização do ensaio de compactação estática: Para cada traço estudo contendo diferentes níveis de incorporação de resíduo foram separadas cinco amostras secas contendo 1 kg de material em cada amostra, totalizando 5 kg de material para cada ponto da curva de compactação estática;
- c) Determinação dos pontos de umidade: Em posse dos dados do ensaio de compactação Proctor Normal, foram utilizados os mesmos valores de água adicionada nos cinco pontos da curva de compactação Proctor Normal de cada traço, a fim de manter fixa a umidade. A quantidade de água utilizada para a realização do ensaio de compactação estática foi proporcional para cada amostra contendo 1 kg de material;
- d) Determinação da força de prensagem: A pressão de 45,20 kg/cm<sup>2</sup> utilizada

para a prensagem dos blocos de encaixe foi a mesma utilizada para a confecção dos corpos-de-prova cilíndricos sendo exercida sobre uma área de  $10,75 \text{ cm}^2$  (área do cilindro) a qual resultou em uma força de 0,49 toneladas de aplicação;

- e) Confecção dos corpos-de-prova: Foram feitos cinco corpos-de-prova em formato cilíndrico para os cinco pontos da curva de compactação, totalizando vinte e cinco unidades para cada traço estudado, sendo um corpo-de-prova destinado a determinação do teor de umidade e massa específica aparente seca e quatro corpos-de-prova destinados ao ensaio de resistência à compressão simples;
- f) Obtenção dos dados para confecção da curva de compactação: Os corpos-de-prova recém conformados foram medidos e pesados para obtenção da massa úmida e volume. Após, os corpos-de-prova destinados à obtenção da curva de compactação estática foram colocados em estufa até atingir a constância da massa para a determinação da massa seca, a fim de obter os valores de massa específica aparente seca e umidade para determinação de cada ponto da curva;
- g) Realização da curva de compactação estática: Foram empregados no mínimo dois pontos da curva no ramo seco e dois pontos no ramo úmido para que a curva de compactação estática possuísse um formato aproximadamente parabólico.
- h) Processo de cura: Os corpos-de-prova recém moldados destinados ao ensaio de resistência à compressão simples foram submetidos ao processo de cura em câmara úmida, mantidos a uma umidade relativa de 95% e temperatura interna de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  por um período de sete dias;
- i) Ensaio de resistência à compressão simples: Após o período de cura de sete dias os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples seguindo as orientações da NBR 12025 (ABNT, 2012).

De posse dos dados do ensaio de compactação estática foi possível avaliar os resultados obtidos no ensaio de compactação Proctor Normal, analisando a influência da compactação estática (prensagem) nos parâmetros de massa específica aparente seca e resistência à compressão simples nas diferentes misturas, definindo os pontos ideais de umidade para moldagem dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário.

As figuras 3-7 (a) a (d) mostram os procedimentos do ensaio de compactação estática e os corpos-de-prova produzidos.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3-7: Ensaio de compactação estática: (a) Preparação da amostra para ensaio; (b) Prensa hidráulica; (c) Corpos-de-prova cilíndricos; (d) Ensaio de resistência à compressão.

Fonte: Própria.



As figuras 3-8 (a) e (b) apresentam o ensaio de compactação Proctor Normal segundo a norma NBR 12023 (ABNT, 2012).



Figura 3-8: Metodologia experimental de compactação: (a) Compactação dinâmica do ensaio Proctor Normal; (b) Instrumentos do ensaio Proctor Normal.

Fonte: Própria.

### 3.2.1.2 Caracterização química

A caracterização química semiquantitativa das amostras de solo e do resíduo do beneficiamento do mármore foram realizadas por meio da técnica de análise química por espectroscopia de fluorescência de raios-X, de energia dispersiva (EDX), em um equipamento Shimadzu EDX-700 do LECIV/UENF.

Através da análise química por espectroscopia de raios-X foram obtidos dados e informações fundamentais para a pesquisa científica, que permitiram uma avaliação parcial da composição mineralógica, propriedades físicas, químicas e tecnológicas.

A perda ao fogo (PF) foi obtida através da seguinte expressão:

$$PF (\%) = [(M_s - M_c)/M_s] \times 100 \quad (\text{Eq. 3.2})$$

sendo:

$M_s$  a massa do material seco a 110 °C (g);

$M_c$  a massa do material calcinado a 1000°C por 2 horas considerando taxa de aquecimento de 10°C/min (g).

### **3.2.1.3 Caracterização mineralógica**

A caracterização mineralógica foi realizada através da difração de raios-X (DRX). O ensaio foi realizado em um difratômetro de pó da marca Rigaku Ultima IV operando com radiação Cobre (Cu-K $\alpha$ ) e varredura de  $2\theta$ , que pertence ao Laboratório de Ciências Físicas (LCFIS) da UENF. Com a realização do ensaio foi possível analisar a estrutura e a microestrutura cristalina das amostras para poder entender suas propriedades.

### **3.2.2 Confeção dos corpos-de-prova**

Para a confecção dos corpos de prova foram utilizados os seguintes materiais: solo tipo arenoso, calcário proveniente do beneficiamento do mármore, cimento CP V-ARI e água.

### **3.2.3 Traços estudados**

O estudo das misturas de solo-cimento e calcário para confecção de blocos de encaixe prensados consistiu em fixar um teor de cimento na mistura e substituir uma quantidade parcial do solo (agregado miúdo) pelo resíduo calcário, a fim de diminuir o consumo da matéria prima natural na mistura e maximizar o uso do resíduo.

Segundo orientação de Sherwood (1993), que recomenda o teor mínimo de 6% de aglomerante para a estabilização química dos solos, para o estudo de dosagem foi fixado o teor de cimento Portland em 10% em relação a massa total do solo. Buscou-se incorporar teores máximos de resíduo calcário em substituição parcial do solo em proporções iniciando em 10% até 100% de resíduo, porém o estudo limitou-se na incorporação de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de resíduo calcário em substituição parcial do solo. Teores acima de 50% de resíduo favoreceram o surgimento de grumos na mistura, não propiciaram a moldagem dos blocos por falta de coesão entre as partículas, além do aparecimento de fissuras no momento da prensagem.

As figuras 3-9 (a) a (c) demonstram as patologias ocasionadas na produção dos blocos com teores maiores que 50% de resíduo calcário em substituição parcial do solo.

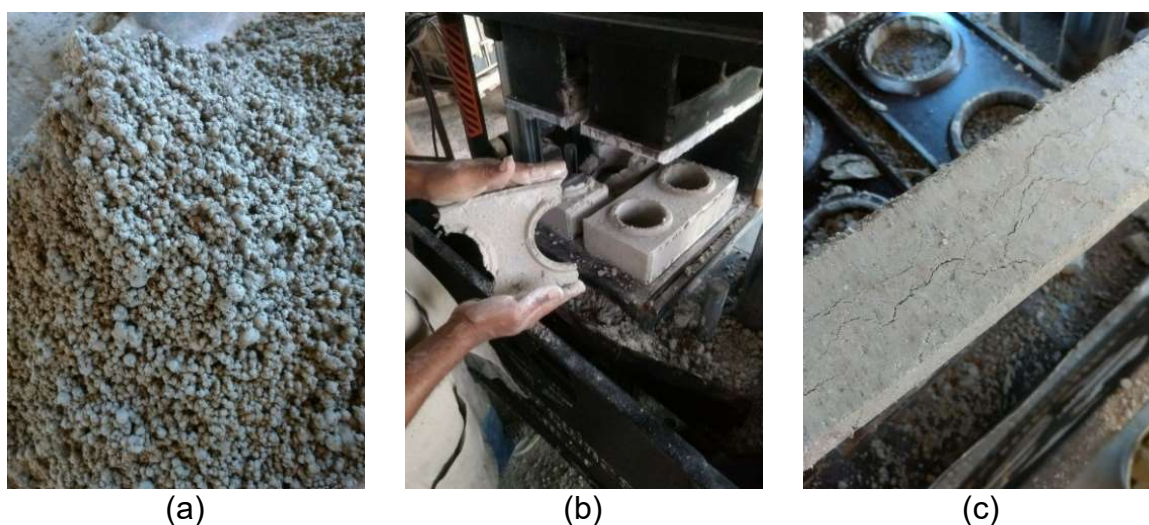


Figura 3-9: Patologias no processo de produção dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário com teores de resíduo acima de 50%: (a) Formação de grumos; (b) Bloco quebradiço por falta de coesão; (c) Fissuras no momento da prensagem.

Fonte: Própria.

A Tabela 3.1 apresenta a composição dos traços que foram estudados. Foi utilizada uma mistura de solo-cimento padrão (Traço de referência -  $T_r$ ), sem resíduo, que serviu como parâmetro de comparação entre as diferentes incorporações de resíduo na mistura.

Tabela 3.1: Composição dos traços utilizados para a fabricação dos corpos-de-prova.

Traços (CIMENTO: RESÍDUO: SOLO)	
Traços	Massa (%)
$T_r$	10:00:90
$T_{10}$	10:10:80
$T_{20}$	10:20:70
$T_{30}$	10:30:60
$T_{40}$	10:40:50
$T_{50}$	10:50:40

Na Figura 3-10 está apresentado um fluxograma do processo de fabricação dos corpos-de-prova. Após, é feita uma descrição de tais etapas.



Figura 3-10: Fluxograma do processo de fabricação do bloco de solo-cimento pela NBR 12024 (ABNT, 2012).

Fonte: Própria.

### 3.2.4 Preparação das Misturas

A primeira etapa para a confecção dos blocos de solo-cimento foi a pesagem das quantidades utilizadas em cada traço com auxílio de uma balança digital.

Após a pesagem dos materiais de cada traço, estes foram misturados e homogeneizados (na ordem solo, resíduo, cimento) em um misturador de eixo vertical até que formassem uma massa suficientemente uniforme (Figura 3-11). Com o auxílio de um borrifador de uso industrial, acrescentou-se água à mistura. O uso do borrifador é essencial para evitar a formação de grumos.



Figura 3-11: Mistura das matérias-primas utilizando um misturador de eixo vertical e borrifador do tipo costal.

### 3.2.5 Moldagem

A mistura, já homogeneizada e com água acrescentada, foi prensada em uma prensa hidráulica modelo 7000 turbo da marca Ecomáquinas (Figura 3-12), pertencente à empresa Artecêrâmica Sardinha, em Campos dos Goytacazes. A prensa hidráulica utilizada para moldagem dos blocos de encaixe funciona com a capacidade de prensagem de até 36 toneladas, porém regulada para uma prensagem padrão de 15 toneladas sobre uma área de 332,0 cm<sup>2</sup> (área do bloco), o que resulta em uma pressão de 45,20 kg/cm<sup>2</sup>.

Assim, os blocos de solo-cimento foram confeccionados no tamanho 30,0cm x 15,0cm (comprimento x largura) e altura variável de 7,0 cm  $\pm$  1,0 cm, com 2 furos de 8,67 cm de diâmetro, com área útil de 80%, seguindo a NBR 10834 (ABNT, 2013).



Figura 3-12: Prensa hidráulica utilizada para confecção de blocos de encaixe.  
Fonte: Própria.

### 3.2.6 Cura

A etapa de cura é uma das etapas mais importantes na confecção de blocos de solo-cimento, pois o ganho de resistência da mistura é dado pela hidratação do cimento Portland e, como mencionado anteriormente, seu processo de fabricação dispensa o processo de queima.

Após prensados e desmoldados na Cerâmica, os blocos foram levados para o LECIV, em sequência foram identificados e, então, foi realizado o processo de cura em câmara úmida (Figura 3-13), com umidade relativa interna de 95% e temperatura interna de 23  $\pm$  2°C, onde permaneceram na câmara até atingirem as idades de realização dos ensaios, conforme descrito pela NBR 12024 (ABNT, 2012).

A câmara úmida (adaptada) consistiu no emprego de uma caixa d'água de polietileno com capacidade de 1500 litros. Utilizou-se uma lâmina d'água no fundo da caixa com altura de 15 cm a fim de umedecer toda a área interna. Foram confeccionados cinco suportes de madeira com o propósito de acomodar os blocos em camadas sobrepostas e espaçadas entre si a uma altura de 15 cm, sem que os blocos fossem empilhados e tivessem contato com a lamina d'água. Para controle do teor de umidade e temperatura interna, utilizou-se um termo-higrômetro digital da marca Incoterm. A caixa d'água foi devidamente vedada com tampa para que

não ocorresse a troca de temperatura e umidade com o ambiente externo. A câmara úmida foi instalada sobre o piso de concreto de uma sala climatizada com ar condicionado a fim de controlar a temperatura externa para que não houvesse grande variação na temperatura interna da caixa d'água.



Figura 3-13: Cura úmida dos blocos de encaixe.  
Fonte: Própria.

### 3.2.7 Análise das propriedades das misturas

As propriedades estudadas neste trabalho foram: massa específica, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade por molhagem e secagem.

Na Tabela 3.2 são apresentados valores limites estipulados pela NBR 10834 (ABNT, 2013) para absorção de água e resistência à compressão aos 28 dias de cura dos blocos de solo-cimento. Através destes parâmetros foi possível julgar a aceitação ou mesmo a rejeição dos blocos fabricados.

Tabela 3.2: Valores estipulados pela NBR 10834 (ABNT, 2013) para os ensaios de absorção de água e resistência à compressão dos blocos de solo-cimento.

Valor limite – 28 dias de cura	Médio	Individual
Absorção de água (%)	≤ 20	≤ 22
Resistência à compressão (MPa)	≥ 2,0	≥ 1,7

#### 3.2.7.1 Ensaio de massa específica

A obtenção da massa específica aparente neste trabalho teve a finalidade de

controlar os parâmetros obtidos no ensaio experimental de compactação, visando obter a máxima massa específica aparente seca em função do teor de umidade encontrado.

Para a realização do ensaio foram utilizados cinco corpos-de-prova recém conformados, tendo sido medidos, pesados e colocados em estufa para a determinação do teor de umidade e da massa específica aparente seca nas primeiras 24 horas. Caso os blocos não atendessem aos valores de massa específica aparente seca e umidade obtidos no ensaio de compactação estática, considerando uma margem de erro de  $\pm 2,0\%$ , o lote produzido seria descartado.

Para a determinação da massa específica aparente seca ( $D_a$ ) foi empregada a seguinte fórmula:

$$D_a \text{ (g/cm}^3\text{)} = (m_s / v) \times 100 \quad \text{(Eq. 3.3)}$$

em que:

$m_s$  é a massa seca do corpo-de-prova (g);

$v$  é o volume do corpo de prova ( $\text{cm}^3$ ).

Para a determinação do teor de umidade ( $U$ ) dos corpos-de-prova recém conformados, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$U \text{ (\%)} = [(m_u - m_s / m_s)] \times 100 \quad \text{(Eq. 3.4)}$$

em que:

$m_u$  é a massa do corpo de prova saturado (g);

$m_s$  é a massa do corpo de prova seco (g).

Foi realizada uma média das medidas de massa dos corpos-de-prova obtidas com auxílio de uma balança digital e a média de suas dimensões mensuradas através de paquímetro.

### **3.2.7.2 Ensaio de absorção de água**

Para realização deste ensaio, que segue as prescrições da NBR 13555 (ABNT, 2012), foram utilizados cinco corpos-de-prova para cada traço estudado,



ensaiados nas idades de 7, 28 e 56 dias. Utilizou-se para realização dos ensaios os seguintes equipamentos: uma balança digital, um recipiente com água para servir como tanque de imersão para os corpos-de-prova, uma estufa e os devidos corpos-de-prova curados em suas idades.

A capacidade de absorção de água (AA) foi calculada utilizando a seguinte expressão:

$$AA (\%) = [(m_u - m_s / m_s)] \times 100 \quad (\text{Eq. 3.5})$$

sendo:

$m_s$  a massa do corpo de prova seco (g);

$m_u$  a massa do corpo de prova saturado (g).

A Figura 3-14 mostra os corpos-de-prova imersos para realização do ensaio de absorção de água.



Figura 3-14: Procedimento para ensaio de absorção de água.

Fonte: Própria.

### 3.2.7.3 Ensaio de resistência à compressão simples

Para os ensaios de resistência à compressão foram adotadas as orientações da NBR 10836 (ABNT, 2013). Foram confeccionados seis corpos-de-prova para cada traço estudado, ensaiados nas idades de 7, 28 e 56 dias. Após passado o período de cura, os corpos-de-prova foram cortados ao meio, suas faces extremas foram devidamente capeadas com auxílio de uma pasta à base de cimento e água e os mesmos foram ensaiados em um equipamento da marca SOLOTEST disponível no LECIV, conforme apresentado nas Figuras 3-15(a) a (c).



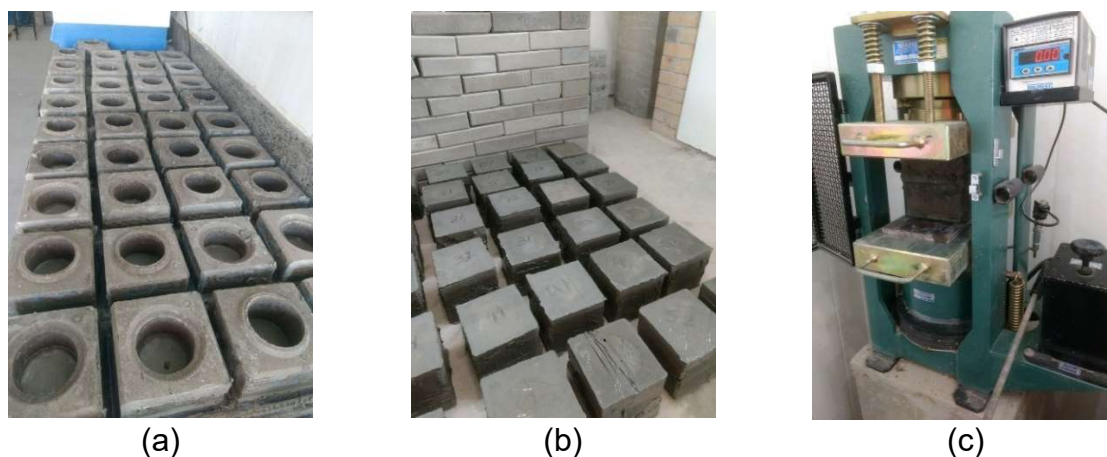


Figura 3-15: Procedimento para ensaio de resistência à compressão simples: (a) Capeamento em uma face dos blocos; (b) Blocos capeados; (c) Ensaio de resistência à compressão.

Fonte: Própria.

#### 3.2.7.4 Ensaio de durabilidade

Após o período de sete dias de cura dos blocos de encaixe, seis corpos-de-prova de cada traço foram submetidos a seis ciclos de molhagem em água e secagem em estufa para determinação da perda de massa, cujo limite máximo atribuído pela ABCP (1980) é 10%. Os ensaios foram realizados conforme orientação da NBR 13554 (ABNT, 2012).

A Figura 3-16 ilustra os blocos de encaixe sendo submetidos ao ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.



Figura 3-16: Procedimento de secagem dos corpos-de-prova a 72 °C em estufa.

Fonte: Própria.

Para a determinação da perda de massa (PM), parâmetro indicativo da durabilidade do material, usa-se a seguinte expressão, retirada da NBR 13554 (ABNT, 2012):

$$P_m (\%) = [(m_i - m_{fc} / m_i)] \times 100 \quad (\text{Eq. 3.6})$$

sendo:

$P_m$  a perda de massa do corpo-de-prova, em (%);

$M_{fc}$  a massa final corrigida do corpo-de-prova, em (g);

$M_i$  a massa inicial calculada por ocasião da moldagem do corpo-de-prova, em (g).

Após a realização dos ensaios de durabilidade, acrescentou-se a esta metodologia para avaliar melhor os parâmetros de degradação dos corpos-de-prova, a determinação da resistência à compressão simples pela NBR 10836 (ABNT, 2013) aos 28 dias de idade. Os resultados obtidos foram comparados com as amostras não submetidas ao ensaio de durabilidade.

### **3.2.8 Critério de avaliação dos blocos**

As propriedades dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário, como taxa de absorção de água, resistência à compressão simples e durabilidade, foram avaliadas seguindo os valores de aceitação normatizados pela ABNT, tendo em vista que o presente estudo tem por objetivo produzir blocos de solo-cimento e resíduo calcário com características enquadradas nas normas vigentes, com potencial de comercialização e uso na construção civil.

### **3.2.9 Tratamento dos dados**

#### **3.2.9.1 Tamanho Mínimo de Lote (TML)**

O critério do tamanho mínimo de lotes é adotado para pesquisas que envolvem número limitado de amostras, ou seja, amostras menores que 30 unidades. O critério analisa a representatividade das amostras em um determinado ensaio visando obter a consistência do experimento, de modo que as amostras analisadas representem o universo amostral satisfatoriamente, uma vez que o tamanho do lote é diretamente proporcional à consistência dos dados.

É considerado no critério do TML que a função de frequência acumulada deve ser distribuída em classes em que os dados se comportam como uma distribuição normal adotando o grau de confiabilidade de 95%.

O procedimento de cálculo inclui a determinação do número inicial mínimo do lote ( $n_0$ ) e em seguida calcula-se o número mínimo de lote ( $n$ ). As equações levam em consideração o cálculo do desvio padrão e também o valor tabelado de *t-Student* para  $n-1$  graus de liberdade do conjunto de dados.

Têm-se as equações para a determinação do número inicial mínimo do lote ( $n_0$ ) e o número mínimo de lote ( $n$ ):

$$n_0 = \frac{t S_x}{r x_m} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

$$n = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{n_0}{N}\right)} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

em que:

$t$  é a variável aleatória da distribuição de Student para  $n-1$  graus de liberdade;

$r$  é o parâmetro relativo à incerteza aceita (acurácia);

$x_m$  é a média do lote;

$S_x$  é o desvio padrão do lote;

$N$  é o número de dados do lote.

### 3.2.9.2 Critério de Chauvenet

O método é baseado na teoria da probabilidade, considerando a eliminação racional de dados que estejam fora da tendência dominante. Os dados são representados pela função de frequência da distribuição normal, com eliminação de valores máximos e mínimos quando surgirem dúvidas quanto à variação das medidas realizadas.

A probabilidade de um valor se desviar do valor da média esperada terá que ser menor que  $1/n$ , sendo  $n$  o número de medições de uma grandeza, que deverá ser um valor grande. Os resultados então devem seguir uma distribuição gaussiana,

permitindo quantificar um dado fora do padrão esperado para então eliminá-lo do conjunto de dados da pesquisa. O critério estabelece que o valor medido pode ser rejeitado se a probabilidade  $m$  de obter o desvio em relação à média for menor que  $1/2n$ .

Segundo Xavier (2006) a razão de desvio (DR) entre um determinado valor e a média pode ser realizado através da seguinte expressão:

$$DR = \frac{x - x_m}{S_x} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

sendo:

$x$  o valor medido;

$x_m$  o valor médio do lote avaliado;

DR é a razão de desvio entre o máximo desvio ( $x - x_m$ ) e o desvio padrão  $S_x$ .

O critério de Chauvenet é comparado com valores tabelados de desvio máximo aceitável  $DR_0$  para eliminação de valores duvidosos.

Na Tabela 3.3, têm-se os valores de  $DR_0$  para diferentes números de leituras.

Tabela 3.3: Valores de  $DR_0$ .

Valor Tabelado	
Número de leituras ( $n$ )	$DR_0$
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
200	3,14

Fonte: Adaptado de Xavier (2006).

Para o critério de Chauvenet são utilizadas as seguintes hipóteses:

- $H_0$  (hipótese inicial):  $DR_{m\acute{a}x}$  ou  $DR_{m\acute{i}n} \leq DR_0$ , então é aceito o valor considerado;
- $H_1$  (hipótese alternativa):  $DR_0 \leq DR_{m\acute{a}x}$  ou  $DR_{m\acute{i}n}$ , então é rejeitado o valor máximo ou mínimo e procede-se novamente a análise, desconsiderando-se os dados já eliminados.

### 3.2.9.3 Delineamento experimental

Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado na avaliação das variáveis. Foram utilizadas como unidades experimentais cinco repetições para os ensaios de massa específica aparente e durabilidade e seis repetições para o ensaio de resistência à compressão dos blocos submetidos ao ensaio de durabilidade. A unidade experimental básica por repetição foi composta por um corpo-de-prova em formato de bloco de encaixe. Os dados obtidos foram submetidos aos testes de homogeneidade (Cochran e Bartlett) e normalidade (Lilliefors) sem restrições para análise de variância (ANOVA,  $p \leq 0,05$ ) da regressão polinomial e ajuste das equações de regressão em função dos níveis de incorporação de resíduo calcário (traços  $T_r$ ,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ,  $T_{40}$  e  $T_{50}$ ), selecionando-se os melhores ajustes para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) cujos termos da equação foram significativos pelo teste t ( $p \leq 0,05$ ). Adicionalmente, realizou-se a comparação de médias pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) em cada tempo de cura.

Para os ensaios de absorção de água e resistência à compressão simples foram utilizadas como unidades experimentais cinco repetições para o primeiro e seis repetições para o último. Os dados obtidos foram analisados pelos mesmos procedimentos estatísticos utilizados nos ensaios anteriores, contudo, considerando-se o uso do DIC, em esquema fatorial  $3 \times 6$ , sendo três tempos de cura (7, 28 e 56 dias) e seis níveis de incorporação de resíduo calcário (traços  $T_r$ ,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ,  $T_{40}$  e  $T_{50}$ ).

Utilizou-se a ferramenta computacional Sistema de Análises Estatísticas – SAEG 9.2 para avaliação dos dados e realização das análises experimentais.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais desenvolvidos para realização deste trabalho.

### 4.1 Caracterização dos materiais

#### 4.1.1 Caracterização física do solo

##### 4.1.1.1 Granulometria do solo

A Figura 4-1 apresenta a curva de distribuição de partículas do solo, obtida via análise combinada de sedimentação e peneiramento.

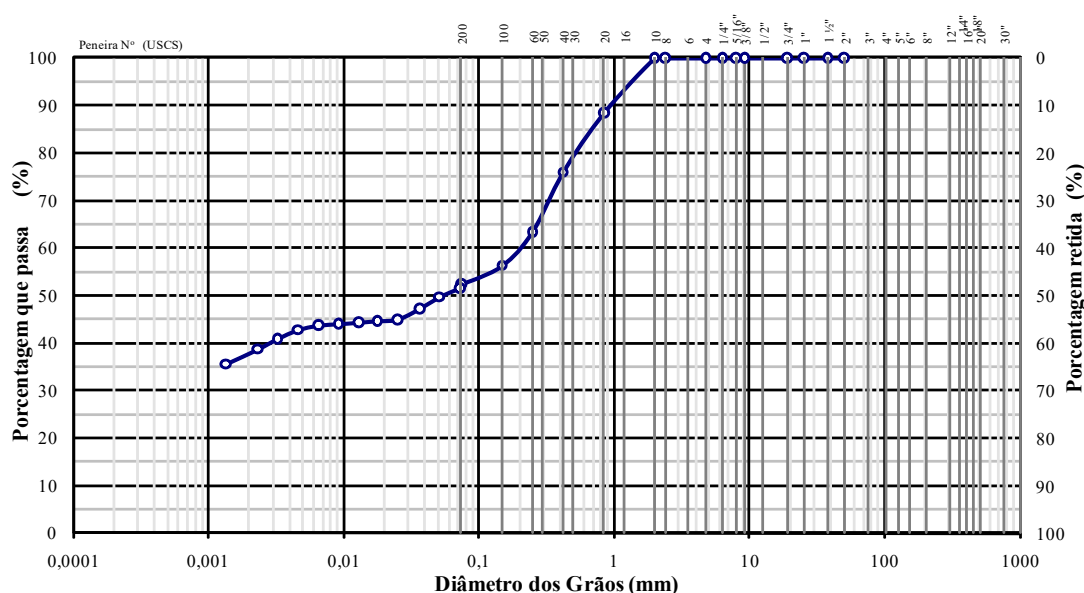


Figura 4-1: Curva granulométrica do solo.

Fonte: Própria.

O solo utilizado segundo sua distribuição de partículas apresenta cerca de 49% de fração areia, 38% de fração argila e 13% de fração silte. Devido à sua granulometria, o solo utilizado pode ser classificado como um solo areno argiloso. Os resultados revelam que o solo escolhido atende aos parâmetros previstos pela ABCP para utilização da prática de solo-cimento, ou seja, 100% dos grãos passando na peneira nº4 e de 10% a 50% dos grãos passando na peneira nº 200.

Os limites de consistência de Atterberg do solo apresentaram Limite de Liquidez de 42,9% e Limite de Plasticidade de 22,2%, obtendo então o Índice de Plasticidade de 20,7%. Para a fabricação de blocos de solo-cimento, a NBR 10833 (ABNT, 2012) orienta utilizar solos com o limite máximo de 45% sobre o Limite de

Liquidez e 18% para o Limite de Plasticidade, logo, pode ser observado que o Limite de Plasticidade do solo utilizado na pesquisa ficou 20% acima dos parâmetros indicados pela referida norma, porém, o presente estudo objetiva a substituição parcial do solo pelo resíduo calcário, caracterizado como sendo não plástico, portanto os limites de consistência diminuem com a adição de resíduo na mistura, fazendo com que essa diferença não apresente relevância na utilização deste solo.

Verificou-se que o solo utilizado nesta pesquisa está enquadrado nas orientações do CEPED (1999) para confecção de blocos de solo-cimento no qual se têm as seguintes proporções: areia variando de 45% a 90%, silte mais argila variando entre 10 e 55% e Limite de Liquidez inferior a 45%. Esses valores são recomendados para uma menor utilização de cimento na mistura, o que promove a otimização na fabricação de blocos de solo-cimento.

#### 4.1.1.2 Massa específica real dos grãos do solo

A massa específica real dos grãos da amostra de solo foi de 2,68 g/cm<sup>3</sup>, obtida utilizando a picnometria. Este valor reflete os minerais que estão presentes neste solo. Na Tabela 4.1 apresentam-se alguns minerais do solo e suas respectivas densidades.

Tabela 4.1: Massa específica real dos grãos de alguns minerais.

Mineral	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Quartzo	2,65 – 2,67
Caulinita	2,61 – 2,66
Ilita	2,60 – 2,86
Mulita	3,10 – 3,20
Gibsita	2,40 – 2,44
Goetita	3,30 – 4,30

Fonte: Adaptado de Siqueira (2013).

#### 4.1.1.3 Teor de umidade da mistura

As figuras 4-2 (a) a (f) ilustram os resultados da massa específica aparente obtidos no ensaio experimental de compactação estática e compactação Proctor Normal para seis traços estudados nesta pesquisa. As figuras 4-3 (a) a (f) apresentam os resultados de resistência à compressão para cada ponto da curva de compactação estática dos seis traços estudados.

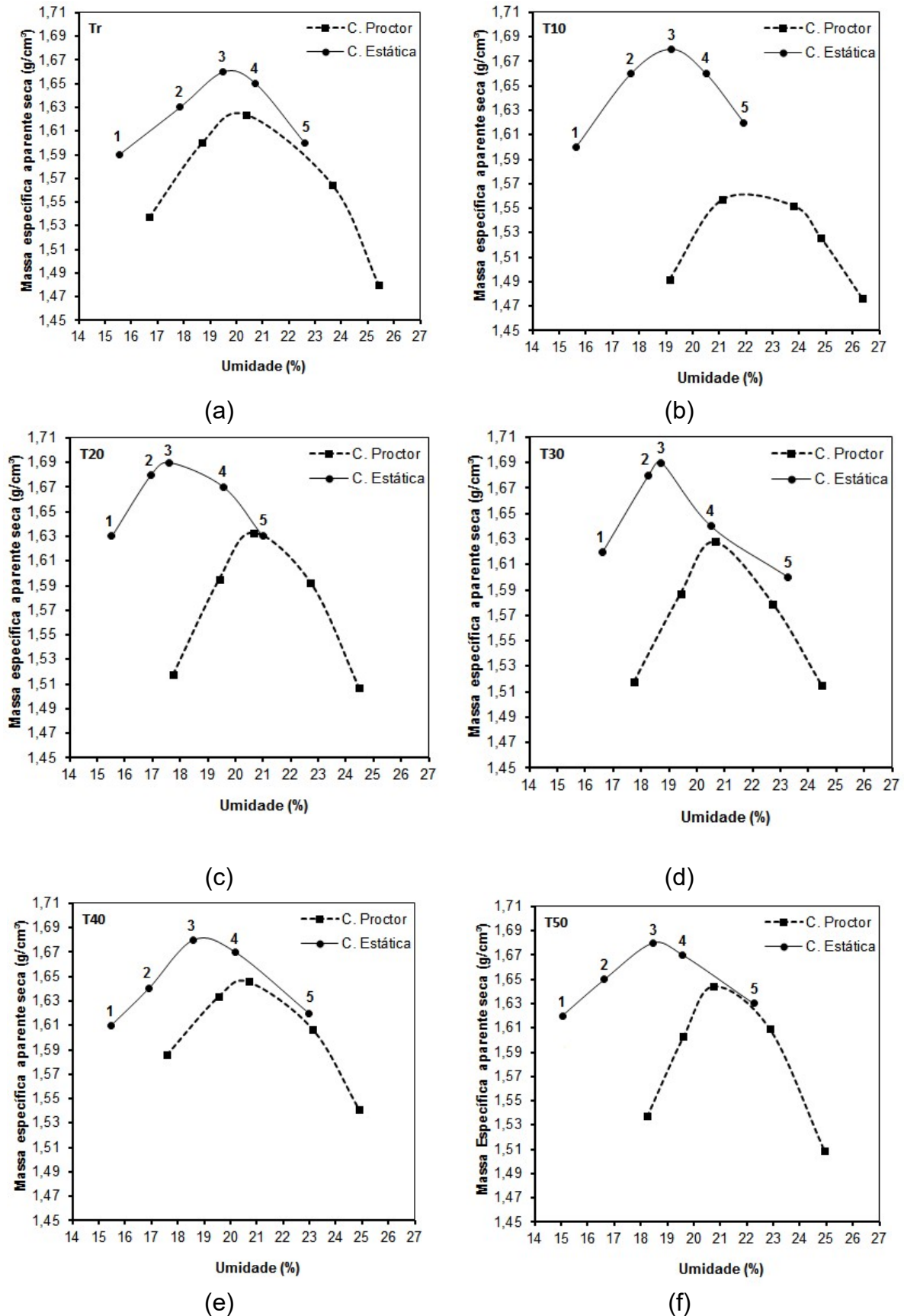
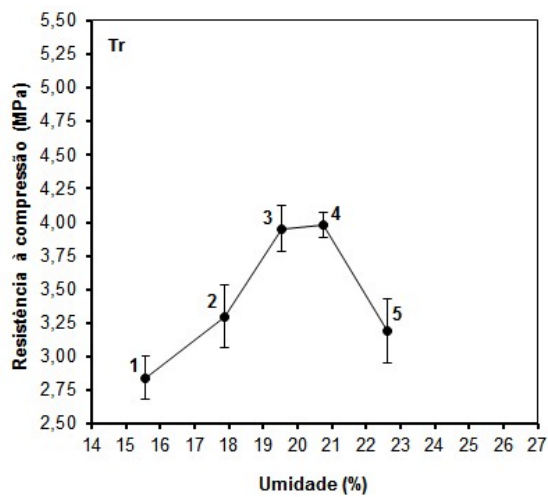
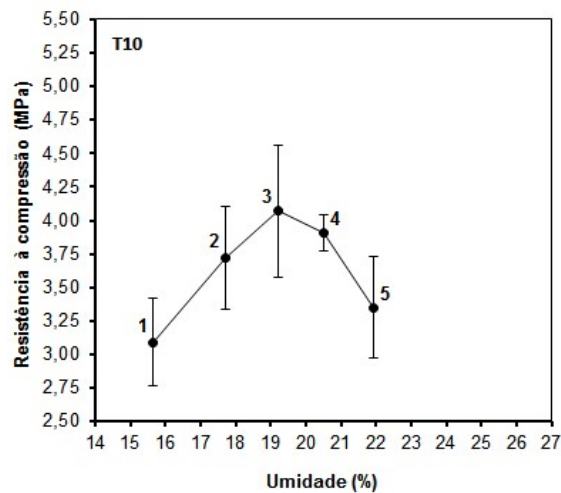


Figura 4-2: Resultados dos ensaios de compactação estática e compactação Proctor Normal para os traços: (a) T<sub>r</sub>; (b) T<sub>10</sub>; (c) T<sub>20</sub>; (d) T<sub>30</sub>; (e) T<sub>40</sub>; (f) T<sub>50</sub>.

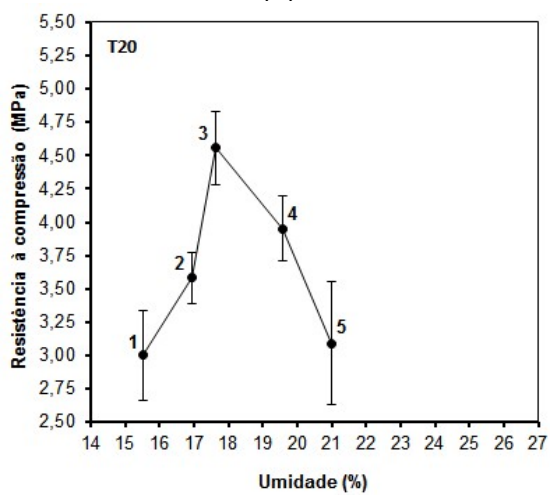




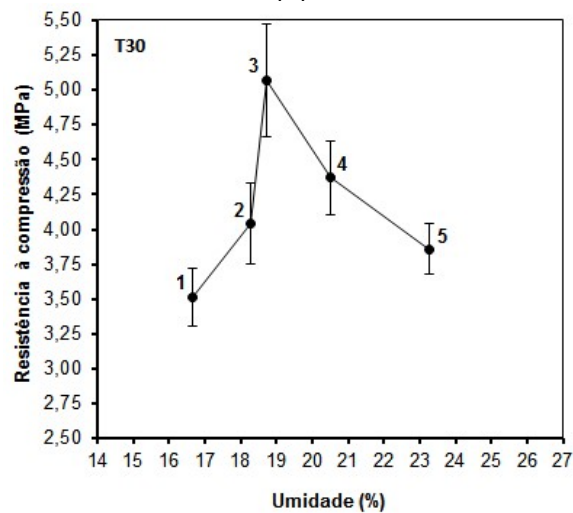
(a)



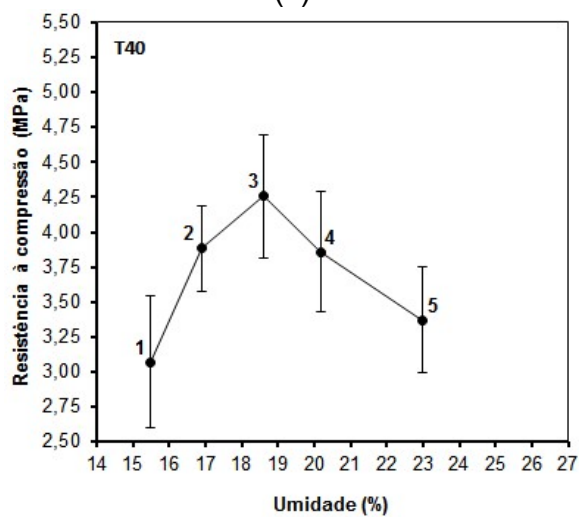
(b)



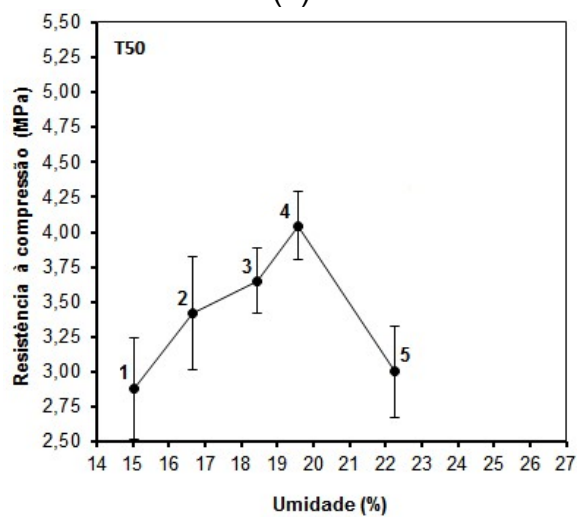
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4-3: Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos pontos obtidos nos ensaios de compactação estática para os traços: (a)  $T_r$ ; (b)  $T_{10}$ ; (c)  $T_{20}$ ; (d)  $T_{30}$ ; (e)  $T_{40}$ ; (f)  $T_{50}$ .

O ensaio de compactação estática visou estabelecer a máxima massa específica seca em função da umidade, utilizando um método de compactação estática (prensagem), analisando a influência do teor de umidade e das diferentes massas específicas em função da resistência à compressão simples para cada ponto da curva de compactação.

O ensaio de compactação Proctor Normal, que é dinâmico, foi realizado para efeito de comparação com os valores de umidade e máxima massa específica encontrados no ensaio de compactação estática. Através da análise dos resultados dos diferentes ensaios experimentais foi possível observar a influência dos dois métodos de compactação, definindo a umidade ótima de moldagem para cada traço.

Analisando a Figura 4-2, nota-se diferença nos valores de massa específica em função da umidade, justificada pelas diferentes energias de compactação aplicadas nos dois métodos de compactação aqui empregados (dinâmica e estática).

Podem ser observados na Figura 4-2 (a) os resultados do ensaio de compactação estática referente ao traço  $T_r$ , sem adição de resíduo, em que o valor da máxima massa específica aparente seca foi de  $1,66 \text{ g/cm}^3$  para um teor de umidade de 19,51%. Os corpos-de-prova ensaiados à compressão para o ponto da máxima massa específica do traço  $T_r$  (ponto 3) obtiveram a média de 3,95 MPa de resistência, ficando abaixo da máxima resistência à compressão que foi de 3,98 MPa (ponto 4 na Figura 4-3 (a)). Em comparação com os demais pontos da curva de compactação estática em que os valores de massa específica e resistência à compressão foram decrescentes, pode-se dizer que a umidade ótima de moldagem estaria entre 19,51% e 20,74%.

Comparando os resultados da curva de compactação estática do traço  $T_r$  com a curva de compactação Proctor Normal (Figura 4-2 (a)), foi verificado que o percentual de umidade ótima encontrado para o ensaio de Proctor Normal foi de 20,80% para uma máxima massa específica de  $1,62 \text{ g/cm}^3$ . Em termos de umidade, foi possível observar uma igualdade para os dois ensaios, porém foi destacada uma diferença nos valores de massa específica, em que o ensaio de Proctor Normal

apresentou uma queda de 2,41%. Para os dois ensaios, a umidade encontrada seria o valor ótimo de moldagem, porém, em termos de massa específica, o valor de 1,62 g/cm<sup>3</sup> não alcançaria os padrões desejados para uma máxima resistência à compressão.

Analisando os resultados do ensaio de compactação estática para os traços T<sub>10</sub> e T<sub>20</sub> (figuras 4-2 (b) e (c)), foi possível verificar que o valor da máxima massa específica aparente seca foi de 1,68 g/cm<sup>3</sup> e 1,69 g/cm<sup>3</sup> para um teor de umidade de 19,21% e 17,62%, respectivamente. Através do ensaio de resistência à compressão para os traços T<sub>10</sub> e T<sub>20</sub> (Figura 4-3), observou-se que os valores de máxima resistência à compressão encontrados, 4,07 MPa e 4,56 MPa, são equivalentes aos pontos de máxima massa específica encontrados no ensaio de compactação estática (ponto 3). Os gráficos (b) e (c) das figuras 4-2 e 4-3 demonstram que para cada ponto da curva de compactação o ganho de resistência é proporcional à massa específica. É possível verificar também que a adição do resíduo do beneficiamento do mármore na mistura propicia um pequeno aumento da densidade da matriz em comparação com o traço T<sub>r</sub>.

Os resultados obtidos no ensaio de compactação Proctor Normal para os traços T<sub>10</sub> e T<sub>20</sub> (figuras 4-2 (b) e (c)) indicaram os valores de 1,57 g/cm<sup>3</sup> e 1,64 g/cm<sup>3</sup> de máxima massa específica para um teor de umidade de 22,40% e 21,20%, respectivamente. Estes valores se comparados aos resultados obtidos no ensaio de compactação estática, pode ser notada uma diminuição de 6,55% e 2,96% da massa específica e um aumento em média de 16,5% de umidade para os dois traços. Vale destacar que se utilizados os valores de 22,40% e 21,20% de umidade ótima obtidos no ensaio de compactação Proctor Normal para moldagem dos corpos-de-prova pelo método de prensagem, os valores de massa específica e resistência à compressão seriam equivalentes a aproximadamente ao quinto ponto do ramo úmido das curvas de compactação estática, indicando baixos valores de massa específica e resistência à compressão.

Foi observado para os seis traços estudados, que teores de umidade acima de 21,00%, que equivale aproximadamente ao quinto ponto das curvas de compactação estática, apresentaram perda de água no ato da moldagem dos corpos-de-prova, indicando o excesso de água na mistura. A ocorrência da perda de água na moldagem pode ser atribuída a pressão de compactação exercida pela prensa.

Nas figuras 4-4 (a) e (b) são ilustradas a perda de água na moldagem dos corpos-de-prova contendo teores de umidade maiores que 21,00%.



Figura 4-4: Perda de água por excesso de umidade: (a) e (b) Molde dos corpos-de-prova cilíndricos indicando perda de água na base.

Analisando o traço T<sub>30</sub> para o ensaio de compactação estática (Figura 4-2 (d)), foi possível notar que a incorporação de 30% de resíduo na mistura propiciou melhores resultados de massa específica e resistência à compressão dentre os seis traços estudados, obtendo a máxima massa específica de 1,69 g/cm<sup>3</sup> em função do teor de umidade de 18,73%. Para este ponto a resistência obtida foi de 5,07 MPa, indicando assim como o traço T<sub>10</sub> e T<sub>20</sub> que, para cada ponto da curva de compactação estática, o ganho de resistência é proporcional à massa específica (Figura 4-3 (d)). Os valores podem ser justificados devido ao equilíbrio entre os grãos de solo e resíduo calcário, o que ocasionou um melhor empacotamento da matriz, proporcionando, dessa forma, valores mais altos de massa específica e, com isso, a redução do índice de vazios e o aumento da resistência à compressão.

Os resultados obtidos no ensaio de compactação Proctor Normal para o traço T<sub>30</sub> (Figura 4-2 (d)) são análogos aos resultados obtidos nos traços T<sub>10</sub> e T<sub>20</sub>, em que os valores demonstrados apresentaram uma diminuição de 3,55% da máxima massa específica e um aumento de 10,81% da umidade em relação ao ensaio de compactação estática. É possível observar que a umidade ótima de 21,00% para o traço T<sub>30</sub>, obtida no ensaio de compactação Proctor Normal, se comparada ao ensaio de compactação estática, está associada a baixos valores de massa específica e resistência à compressão.

Para os traços T<sub>40</sub> e T<sub>50</sub>, através do ensaio de compactação estática (figuras 4-2 (e) e (f)), foram encontrados os valores de 1,68 g/cm<sup>3</sup> para a máxima massa específica em função do teor de uma umidade de 18,50%. A máxima resistência à compressão para o traço T<sub>40</sub> (Figura 4-3 (e)) foi de 4,25 MPa, que equivale ao ponto da máxima massa específica encontrada (ponto 3). Já o traço T<sub>50</sub> apresentou o valor de 4,05 MPa como máxima resistência à compressão, que equivale ao quarto ponto da curva de compactação estática, na qual a massa específica encontrada é de 1,67 g/cm<sup>3</sup> em função do teor de umidade de 19,59%. Análogo ao traço T<sub>r</sub>, pode-se dizer que a umidade ótima de moldagem está entre 18,50% e 19,59%. Foi possível observar para os traços T<sub>40</sub> e T<sub>50</sub>, no ensaio de compactação estática, a ocorrência de um decréscimo linear nos valores de massa específica aparente seca e resistência à compressão se comparado ao traço T<sub>30</sub>. Esse decréscimo pode ser justificado pelo desequilíbrio granulométrico da mistura, ocasionado pelo alto teor de resíduo (partículas finas), no qual ocorre um aumento da área específica dos grãos e, com isso, necessitando de maiores proporções de cimento para se estabilizar.

O ensaio de compactação Proctor Normal para os traços T<sub>40</sub> e T<sub>50</sub> (figuras 4-2 (e) e (f)) apresentaram resultados análogos aos resultados obtidos nos traços T<sub>10</sub>, T<sub>20</sub> e T<sub>30</sub>, em que os valores indicaram uma diminuição de 2,38% e 1,79% na máxima massa específica aparente seca e um aumento de 11,48% e 13,79% da umidade em relação ao ensaio de compactação estática. É possível observar, assim como para o traço T<sub>30</sub>, que os valores de 21,0% e 21,4% de umidade, encontrados no ensaio de Proctor Normal para os traços T<sub>40</sub> e T<sub>50</sub>, estão associados a baixos valores de massa específica e resistência à compressão, considerados no ensaio de compactação estática.

Através de todas as análises, verificou-se que o ensaio de compactação Proctor Normal apresentou para o traço T<sub>r</sub> teor de umidade ótimo de moldagem equivalente ao ensaio de compactação estática, porém com diferença de 2,41% nos parâmetros de máxima massa específica aparente seca. Já para os demais traços, os valores de umidade ótima encontrados no ensaio de Proctor Normal foram excessivamente altos e quando associados aos resultados do ensaio de compactação estática, resultaram em baixos valores de massa específica e baixa resistência à compressão.

Lopes (2002) destacou em seu estudo que os parâmetros que têm mais influência sobre os resultados de compactação do solo são: energia de compactação,

teor de umidade e consistência do solo. Notou que à proporção em que aumentava a energia de compactação, ocorria um aumento da massa específica aparente seca e, com isso, uma redução do teor de umidade.

Em resumo, pode-se dizer que, a metodologia experimental de compactação estática apresentou resultados confiáveis para a confecção dos blocos de solo-cimento, pois foram utilizadas nesta metodologia as mesmas condições de prensagem na qual os blocos de encaixe foram posteriormente fabricados, indicando então, os valores de umidade ótima para cada traço a ser confeccionado, na qual resultará nos maiores valores de massa específica aparente seca e consecutivamente os maiores resultados de resistência à compressão, proporcionando a otimização na produção dos blocos de encaixe prensados, eximindo erros e ajustes empíricos.

Na Tabela 4.2 tem-se o resumo da composição dos traços utilizados na fabricação dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário contendo os respectivos valores de umidade ótima de moldagem e massa específica aparente seca.

Tabela 4.2: Composição dos traços para confecção dos blocos.

<b>Traços</b>	<b>Cimento: Resíduo: Solo (%)</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Massa específica aparente seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>
T <sub>r</sub>	10:00:90	20,12	1,66
T <sub>10</sub>	10:10:80	19,21	1,68
T <sub>20</sub>	10:20:70	17,62	1,69
T <sub>30</sub>	10:30:60	18,73	1,69
T <sub>40</sub>	10:40:50	18,59	1,68
T <sub>50</sub>	10:50:40	19,02	1,68

#### **4.1.2 Caracterização física do resíduo calcário**

##### **4.1.2.1 Granulometria do resíduo calcário**

A Figura 4-5 apresenta a curva de distribuição de partículas do resíduo calcário, obtida via análise combinada de sedimentação e peneiramento.

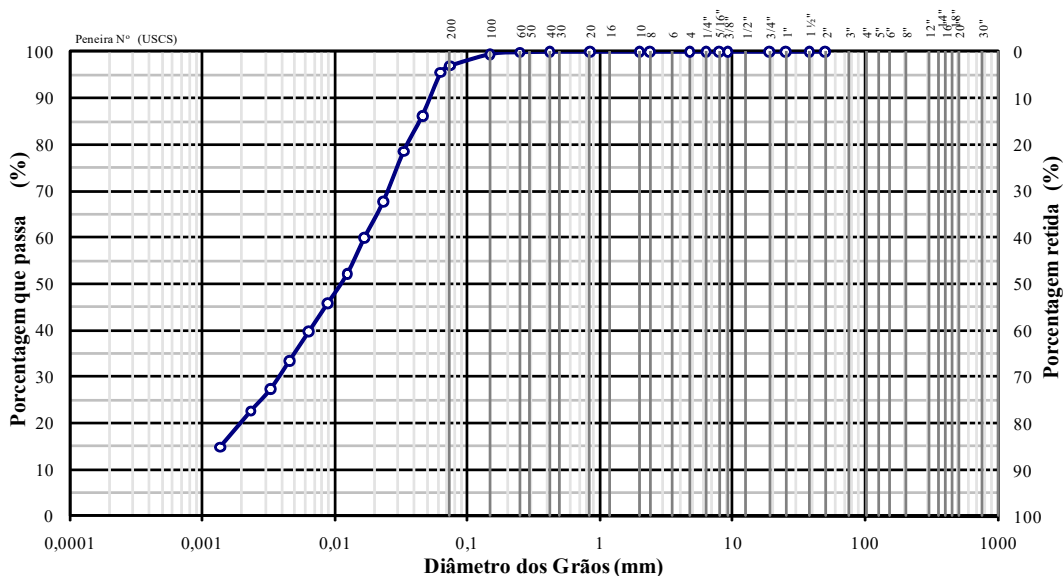


Figura 4-5: Curva granulométrica do resíduo calcário.

A análise granulométrica do resíduo calcário, como mostrada na Figura 4-5, indica que a quantidade de fração silte é da ordem de 73,9%, a fração argila representa 19,9% e o teor da fração areia fina indica 5,9%. Os resultados indicam que o material representa um alto percentual de partículas finas, tratando-se de um material pulverulento que pode atuar na mistura de solo-cimento como filer, preenchendo os vazios existentes nos blocos e aumentando sua compacidade.

O resultado da análise granulométrica do resíduo do mármore feita por Almeida *et al.* (2015), apresentou valores de fração silte de 95%, a fração argila na ordem de 4,5% e o teor de fração areia fina em 0,5%. Nota-se que as granulometrias dos dois resíduos são próximas, porém, o resíduo empregado nesta pesquisa apresenta maior quantidade de partículas na fração areia o que pode contribuir para o aumento da densidade da mistura solo-cimento.

Através dos limites de consistência de Atterberg foi possível classificar o resíduo como não plástico, portanto, quanto maior for a adição de resíduo em uma mistura, menor será sua plasticidade.

#### 4.1.2.2 Massa específica real dos grãos do resíduo

O valor da massa específica real dos grãos obtido foi de  $2,75 \text{ g/cm}^3$ , refletindo a sua composição mineralógica, constituída basicamente de calcita e dolomita.

### 4.1.3 Caracterização química do solo

A caracterização química semiquantitativa do solo utilizado neste trabalho foi realizada através da espectroscopia de raios-X por dispersão de energia e pode ser observada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Composição química do solo.

<b>Composição química do solo (%)</b>	
SiO <sub>2</sub>	51,92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,03
CaO	5,50
K <sub>2</sub> O	2,73
TiO <sub>2</sub>	2,18
SO <sub>3</sub>	0,66
ZrO <sub>2</sub>	0,19
MnO	0,15
Perda ao fogo	7,25

Pode ser observado que o solo é constituído basicamente de óxido de Silício (SiO<sub>2</sub>) e óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), com cerca de 82,39%. Segundo Amaral (2016) a alta quantidade de dióxido de silício sugere a presença de silicatos, quartzo, mica, feldspato e sílica livre. A matéria prima possui composição tipicamente caulínica, conforme já indicado por Vieira *et al.* (2000) que pesquisaram os solos da região, em que há quantidades relevantes de óxido de silício e óxido de alumínio. Os baixos teores de óxido de ferro e dióxido de titânio refletem a coloração acinzentada do solo. A presença do óxido de potássio pode ser associada à presença de feldspatos potássicos.

### 4.1.4 Caracterização química do resíduo calcário

A caracterização química semiquantitativa do resíduo calcário utilizado neste trabalho também foi analisada através da espectroscopia de raios-X por dispersão de energia. Os resultados da análise podem ser observados na Tabela 4.4.



Tabela 4.4: Composição química do resíduo calcário do beneficiamento do mármore.

Composição química do resíduo calcário (%)	
CaO	72,56
MgO	13,96
SiO <sub>2</sub>	9,75
K <sub>2</sub> O	1,46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,35
SO <sub>3</sub>	0,80
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04
CuO	0,03
SrO	0,03
Perda ao fogo	33,00

É possível ver que o resíduo de mármore é composto em sua maioria por óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), que são elementos característicos das rochas carbonáticas. Pode-se observar que este resíduo apresenta composição característica de um material calcário dolomítico, pela relação MgO/CaO que está em torno de 0,19. Calcários dolomíticos apresentam a referida relação entre 0,08 e 0,25.

A perda ao fogo é relativamente alta (33,00%), que está relacionada, principalmente, a volatilização do gás carbônico (CO<sub>2</sub>) devido à decomposição do carbonato de cálcio em temperaturas elevadas. Segundo critérios estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2012), o resíduo do mármore não apresenta características pozolânicas devido à excessiva perda ao fogo, em que o limite máximo de perda ao fogo é de 10% e pela soma dos percentuais de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, cujos valores estão abaixo de 70%.

Quando é feita uma comparação com outro tipo de resíduo calcário do beneficiamento do mármore caracterizado por Almeida *et al.* (2015) (Tabela 4.5), pode ser verificado que o resíduo calcário utilizado na presente pesquisa é mais rico em óxido de cálcio e óxido de magnésio. Isto pode estar ligado aos diferentes tipos de mármore que são beneficiados na empresa de coleta das amostras. Os resultados obtidos por Almeida *et al.* (2015) estão na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: EDX de uma amostra de resíduo calcário do beneficiamento do mármore.

Composição química do resíduo calcário (%)	
CaO	52,40
MgO	9,62
SiO <sub>2</sub>	0,90
K <sub>2</sub> O	0,58
SO <sub>3</sub>	0,40
SrO	0,01
Perda ao fogo	36,00

Fonte: Adaptado de Almeida *et al.* (2015).

Segundo Amaral (2016) a presença de SO<sub>3</sub>, mesmo em baixas proporções, pode ocasionar interferência na hidratação do cimento, retardando o tempo de pega. Dependendo dos fatores externos, a presença do óxido sulfúrico pode contribuir para o tempo de manuseamento da mistura de solo-cimento na fabricação de blocos de solo-cimento e resíduo calcário.

#### 4.1.5 Caracterização mineralógica do solo

Os resultados obtidos por meio da técnica de difração de raios-X para identificação dos argilominerais e minerais presentes na amostra do solo podem ser observados no espectro de Raios-X da Figura 4-6.

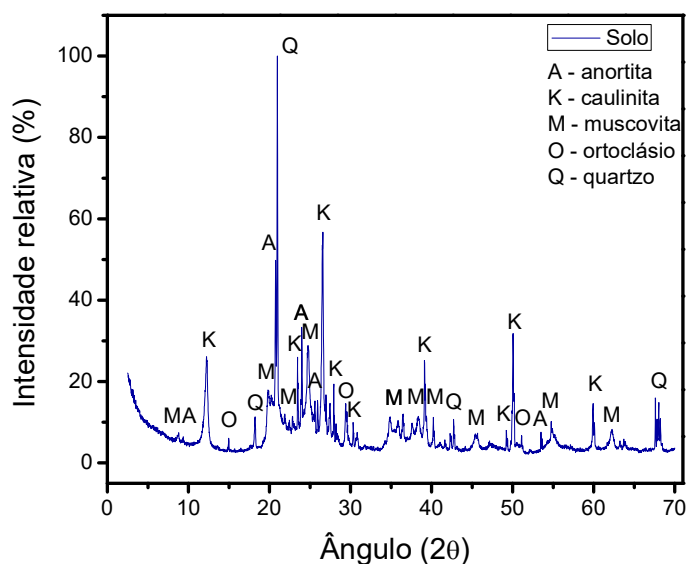


Figura 4-6: Difratograma de raios-x do solo.

Pode ser observado no difratograma de raios-X que o solo utilizado nesta pesquisa apresenta picos característicos de anortita, caulinita, muscovita, ortoclásio e quartzo.

O mineral quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), ou sílica livre, encontrado nas argilas e solos, contribuem para a redução da plasticidade do material. Devido à sua elevada concentração no solo utilizado, se torna atrativa para aplicações em blocos de solo-cimento. Suas partículas apresentam maior dureza, o que contribui para o aumento da resistência mecânica na mistura, além de ser um material inerte, ou seja, não reage com o cimento, propiciando uma melhor estabilização (AMARAL, 2016).

A caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) é o principal argilomineral constituinte do solo utilizado nesta pesquisa, sendo característico dos solos da região de Campos dos Goytacazes (VIEIRA *et al.*, 2000).

A anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) e o ortoclásio ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) são minerais do grupo dos feldspatos, constituído por alumínio e silicato de cálcio. Já a muscovita ( $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ) está presente no grupo das micas, constituídas basicamente de alumínio, sódio ou potássio. Os minerais possuem um baixo coeficiente de condutibilidade e expansão térmica e uma alta resistência a choques térmicos (ZAIYOU *et al.*, 2016).

#### 4.1.6 Caracterização mineralógica do resíduo calcário

Na Figura 4-7 é apresentado o difratograma de raios-X da amostra de resíduo calcário do beneficiamento do mármore utilizado neste trabalho.

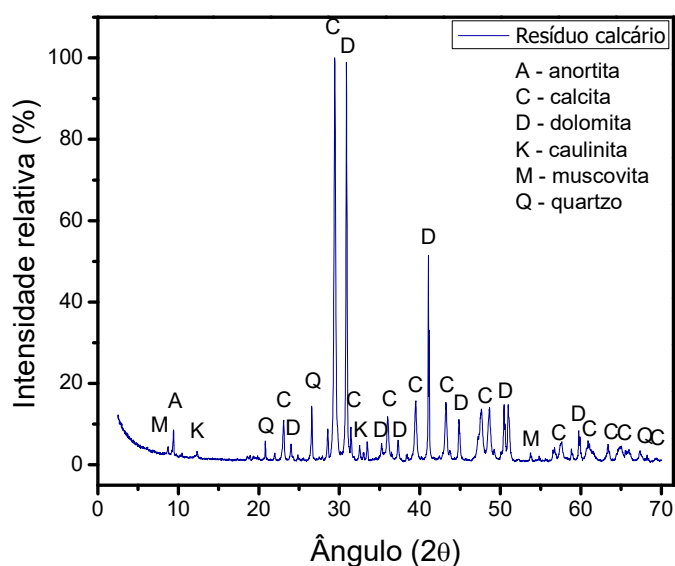


Figura 4-7: Difratograma de raios-X do resíduo calcário.

Através de seus picos característicos, nota-se que o resíduo calcário do beneficiamento do mármore é constituído principalmente de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), sendo esses os principais constituintes das rochas carbonáticas, confirmando assim o exposto pela análise química do resíduo e também pela caracterização mineralógica do resíduo realizado por Almeida *et al.* (2015) e Bilgin *et al.* (2012).

Estão presentes na amostra de resíduo a anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), muscovita ( $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ) e o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) que podem ser associadas a impurezas.

#### **4.2 Análise das propriedades dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário**

O TML, o Critério de Chauvenet e a ANOVA foram realizados para análise dos ensaios de massa específica aparente, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário.

Foi possível verificar através da determinação do TML que as amostragens de todos os ensaios atenderam satisfatoriamente à quantidade mínima exigida para um tratamento consistente dos dados. Os resultados do critério encontram-se no Apêndice B.

Por meio do Critério de Chauvenet foi possível verificar a consistência dos valores obtidos para todos os conjuntos de dados ensaiados. Foram rejeitados os valores máximos e mínimos duvidosos que se enquadraram na hipótese  $H_1$  e refeita toda análise até a aceitação da hipótese inicial  $H_0$ . Os resultados podem ser verificados no Apêndice C.

As análises de variância da regressão polinomial indicaram os melhores ajustes para as diferentes variáveis e podem ser encontradas no Apêndice D. As equações ajustadas e suas referidas discussões estão elencadas nas tabelas e gráficos, apresentadas na sequência.

#### 4.2.1 Massa específica aparente

O ensaio de massa específica aparente foi realizado a fim de controlar a qualidade dos blocos de encaixe de solo-cimento e resíduo calcário, seguindo os parâmetros de massa específica aparente seca encontrados no ensaio de compactação estática apresentados na Tabela 4.2. O ensaio de massa específica também visou analisar a influência da adição do resíduo calcário na mistura de solo-cimento. O ensaio procedeu-se em um período de 24 h após a produção dos blocos, considerando uma margem de erro experimental de 2,0%.

Pode ser observado na Tabela 4.6 que ocorreu o efeito de tratamento quadrático ( $\hat{Y} = -0,00005x^2 + 0,0026x + 1,67$ ) com a adição do resíduo calcário, cuja máxima massa específica foi obtida para os traços T<sub>40</sub> e T<sub>30</sub>, que segundo o teste Tukey suas médias não diferem significativamente entre si.

Tabela 4.6: Valores médios de massa específica aparente seca dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário para os diferentes traços.

V	Traços						Equação	Teste t		R <sup>2</sup>	Xv	Cv
	T <sub>r</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>20</sub>	T <sub>30</sub>	T <sub>40</sub>	T <sub>50</sub>	$\hat{Y} = B_2x^2 + B_1x + B_0$	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>			
M.E.	1,67C (±0,01)	1,69ABC (±0,01)	1,70ABC (±0,01)	1,71A (±0,01)	1,70AB (±0,01)	1,68BC (±0,01)	$\hat{Y} = -0,00005x^2 + 0,0026x + 1,67$	5,63*	-5,43*	0,86*	26,00	0,71

Legenda: V – Variável; M.E. – Massa específica aparente seca. Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na linha e dentro dos tempos de cura, não diferem entre si segundo o teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ; DMS=0,195); (\*) Efeito significativo ( $P \leq 0,05$ ) para a contribuição dos termos de B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> ao modelo de regressão, segundo o Teste t-Student; (\*) Efeito significativo ( $P \leq 0,05$ ) para o coeficiente de regressão (R<sup>2</sup>), segundo o Teste F e (ns) Efeito não significativo.

Na Figura 4-8 é apresentado o diagrama de dispersão dos resultados da massa específica aparente.

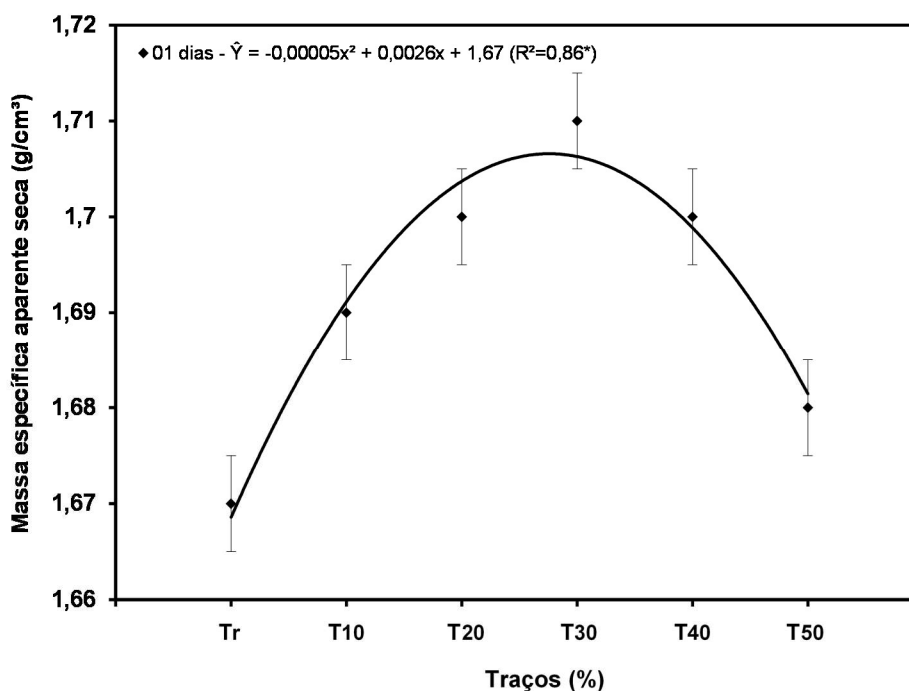


Figura 4-8: Dispersão dos resultados de massa específica aparente.

Pode ser observado na Figura 4-8 que os valores de massa específica aparente seca dos blocos estão dentro dos parâmetros encontrados no ensaio de compactação estática, considerando a margem de erro de  $\pm 2,00\%$  adotada. Com isso pode-se dizer que os lotes foram produzidos com qualidade, pois alcançaram os valores da máxima massa específica aparente seca que estão em função do teor de umidade ótimo de moldagem, comprovando assim a eficiência do método de compactação estática para a determinação da umidade ótima de moldagem.

Através do gráfico de dispersão, foi constatado que o traço T<sub>30</sub> obteve o maior valor de massa específica aparente seca, sendo encontrado o valor de 1,71 g/cm<sup>3</sup>, onde os resultados do teste Tukey verificam o aumento da massa específica aparente com a adição do resíduo calcário em até 40% de incorporação, representando um ganho de 2,40 % em relação ao traço Tr. Para o traço T<sub>50</sub>, contendo teores acima de 50% de incorporação de resíduo, é notado um decréscimo nos valores de massa específica, chegando a apresentar uma queda de 1,79%. Esse comportamento pode ser decorrente do empacotamento da matriz, que demonstrou um melhor equilíbrio granulométrico para o traço contendo a incorporação de 30% e 40% de resíduo calcário.

#### 4.2.2 Absorção de água

Pode ser observado na Tabela 4.7 que os resultados dos ensaios de absorção de água dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário para os diferentes traços curados aos 7, 28 e 56 dias atenderam ao critério estabelecido pela NBR 10834 (ABNT, 2013), em que os resultados obtidos apresentaram uma taxa de absorção de água menor que 20%, indicando sua aplicação como alvenaria de vedação e estrutural.

Tabela 4.7: Valores médios de absorção de água dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário para os diferentes traços e idades de cura.

Cura	Traços						Equação	Teste t		R <sup>2</sup>	Xv	Cv
	T <sub>r</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>20</sub>	T <sub>30</sub>	T <sub>40</sub>	T <sub>50</sub>	$\hat{Y} = B_2x^2 + B_1x + B_0$	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>			
<b>7 dias</b>	17,26AB (±0,46)	15,65BC (±0,50)	15,36C (±1,04)	16,43ABC (±0,77)	17,10AB (±0,56)	17,59A (±0,88)	$\hat{Y} = 0,0026x^2 - 0,108x + 16,91$	-3,16*	3,91*	0,77*	20,77	4,41
<b>28 dias</b>	15,30B (±0,31)	13,97BC (±0,79)	13,70BC (±0,98)	12,63C (±1,00)	13,69BC (±0,81)	17,29A (±1,29)	$\hat{Y} = 0,0054x^2 - 0,249x + 15,70$	-2,41*	2,79*	0,86*	23,05	6,47
<b>56 dias</b>	14,43B (±0,78)	13,98BC (±0,91)	12,74C (±0,28)	13,19BC (±0,82)	14,17BC (±0,59)	16,94A (±0,56)	$\hat{Y} = 0,0044x^2 - 0,183x + 14,76$	-2,16*	2,71*	0,93*	20,79	4,90

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na linha, não diferem entre si segundo o teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ; DMS=0,164); (\*) Efeito significativo ( $P \leq 0,05$ ) para a contribuição dos termos de B1 e B2 ao modelo de regressão, segundo o Teste t-Student; (\*) Efeito significativo ( $P \leq 0,05$ ) para o coeficiente de regressão (R<sup>2</sup>), segundo o Teste F e (ns) Efeito não significativo.

Através dos resultados contidos na Tabela 4.7 é possível notar que ocorreram efeitos de tratamento quadrático com a incorporação do resíduo calcário para os blocos curados aos 7, 28 e 56 dias. Pode ser observado para os blocos curados aos 28 dias, com confiabilidade de 86%, que o traço T<sub>30</sub> apresentou o menor valor de absorção de água, porém através do teste Tukey pode ser verificado que as médias de valores dos traços T<sub>30</sub> e T<sub>40</sub> não diferiam significativamente entre si, então é possível afirmar que a incorporação de 40% de resíduo calcário propiciou em menores valores de absorção de água aos 28 dias, já para os blocos curados nas idades de 7 e 56 dias, os valores de menor absorção de água foram para o traço T<sub>20</sub>, indicando uma variabilidade nos parâmetros de absorção de água para os 3 níveis de cura, no qual essa variação pode ser justificada também pelo teste Tukey, em que os blocos curados aos 7 dias não apresentaram diferenciação de médias para os traços T<sub>20</sub> e T<sub>30</sub> e para os blocos curados aos 56 dias as médias para os traços T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub> e T<sub>40</sub> não diferiram entre si. Através das análises pode se concluir que o traço T<sub>40</sub> apresentou menores valores de absorção de água em idades mais avançadas 28 e 56 dias de cura.

Na Figura 4-9 é apresentado o diagrama de dispersão dos resultados do ensaio de absorção de água dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário.

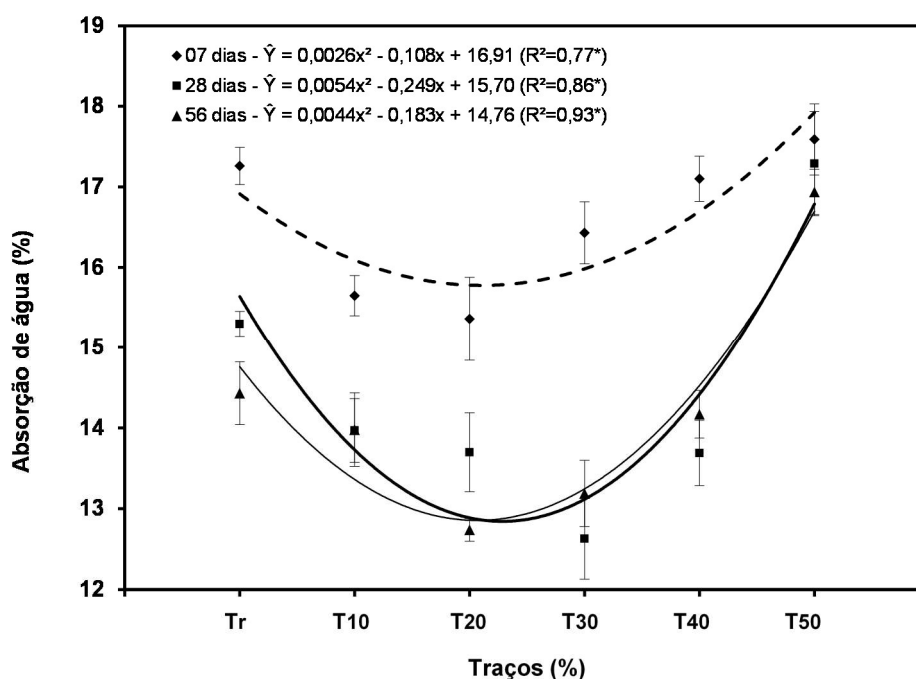


Figura 4-9: Dispersão dos resultados de absorção de água.



É possível observar através da Figura 4-9 que o fator tempo de cura apresenta grande influência nos parâmetros de absorção. Verificou-se que os blocos de solo-cimento e resíduo calcário curados aos sete dias apresentaram maior absorção de água, contudo os blocos que foram submetidos ao tempo de cura de 28 dias obtiveram uma redução média de aproximadamente 10% na absorção de água para as incorporações de até 30% e 40% de resíduo calcário. Já para os blocos curados aos 56 dias, foi possível observar que a absorção se manteve estável se comparado aos blocos curados aos 28 dias.

Foi comprovado através do ensaio de absorção de água, para todos os tempos de cura, a influência da incorporação do resíduo calcário nos diferentes traços estudados. Nas idades de 28 e 56 dias a incorporação de 40% de resíduo (Traço T<sub>40</sub>) proporcionou uma significativa diminuição na absorção de água se comparado ao traço T<sub>r</sub>. Amaral (2016) descreve esse comportamento como sendo resultado de uma redução da porosidade aberta do material devido ao efeito fíler de atuação do resíduo na mistura. Para todos os tempos de cura, os resultados revelaram uma tendência a uma maior absorção de água dos blocos confeccionados com teores de resíduo calcário superiores a 50%.

#### **4.2.3 Resistência à compressão simples**

Os resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão simples dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário curados aos 7, 28 e 56 dias atenderam ao critério estabelecido pela NBR 10834 (ABNT, 2013), no qual as resistências à compressão média dos blocos apresentaram valores superiores a 2,0 MPa. Os blocos curados aos 28 dias de idade apresentaram valores de resistência à compressão médias entre 3,10 MPa e 4,73 MPa, indicando que o produto se enquadra na classe C, blocos com função estrutural para o uso de elementos de alvenaria acima do nível do solo, conforme requisitos da NBR 6136 (ABNT, 2016).

Através da Tabela 4.8 pode ser observado para todas as idades de cura que ocorreram efeito de tratamento quadrático com a incorporação do resíduo calcário, apesar do grau de confiabilidade para os corpos-de-prova curados a 28 dias apresentarem o coeficiente de determinação ( $R^2 = 76\%$ ), que pode ser considerado abaixo do ideal, optou-se em manter o modelo, tendo em vista o princípio da parcimônia, que prevê que a estimativa estatística mais simples, capaz de abranger o maior número de observações relacionadas a um determinado fenômeno, deve ser assumida como a correta, evitando a larga probabilidade de erros associados às explicações mais complexas.

Tabela 4.8: Valores médios de resistência a compressão simples dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário para os diferentes traços e idades de cura.

Cura	Traços						Equação	Teste t		$R^2$	Xv	Cv
	$T_r$	$T_{10}$	$T_{20}$	$T_{30}$	$T_{40}$	$T_{50}$	$\hat{Y} = B_2x^2 + B_1x + B_0$	$B_1$	$B_2$			
<b>7 dias</b>	2,04B ( $\pm 0,18$ )	2,46B ( $\pm 0,33$ )	2,33B ( $\pm 0,29$ )	3,13A ( $\pm 0,08$ )	3,03A ( $\pm 0,31$ )	2,36B ( $\pm 0,10$ )	$\hat{Y} = -0,00088x^2 + 0,056x + 1,95$	4,17*	-3,34*	0,63*	31,82	9,66
<b>28 dias</b>	3,10C ( $\pm 0,15$ )	3,48BC ( $\pm 0,21$ )	3,74B ( $\pm 0,24$ )	4,43A ( $\pm 0,31$ )	3,69B ( $\pm 0,22$ )	3,28BC ( $\pm 0,50$ )	$\hat{Y} = -0,0014x^2 + 0,097x + 2,073$	5,56*	-5,40*	0,76*	34,64	8,24
<b>56 dias</b>	3,20D ( $\pm 0,07$ )	3,38CD ( $\pm 0,41$ )	3,65CD ( $\pm 0,22$ )	4,80A ( $\pm 0,42$ )	4,35AB ( $\pm 0,20$ )	3,87BC ( $\pm 0,19$ )	$\hat{Y} = -0,001x^2 + 0,07x + 2,32$	4,98*	-3,75*	0,72*	35,00	7,50

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na linha, não diferem entre si segundo o teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ;  $DMS=0,42$ ); (\*) Efeito significativo ( $P \leq 0,05$ ) para a contribuição dos termos de  $B_1$  e  $B_2$  ao modelo de regressão, segundo o Teste t-Student; (\*) Efeito significativo ( $P \leq 0,05$ ) para o coeficiente de regressão ( $R^2$ ), segundo o Teste F e (ns) Efeito não significativo.

Pode ser observado na Tabela 4.8 para a idade de 28 dias de cura, que o traço T<sub>30</sub> apresentou o maior valor de resistência à compressão simples, confirmado pela derivada da equação (Xv) e pelo teste Tukey, Já para as idades de cura de 7 e 56 os resultados indicaram que o traço T<sub>30</sub> resultou também nos maiores valores de resistência à compressão simples, porém se observado através do teste Tukey, as médias dos traços T<sub>30</sub> e T<sub>40</sub> não diferiram entre si, demonstrando então que para as idades de 7 e 56 dias a incorporação de até 40% de resíduo propiciou nos melhores resultados de resistência à compressão.

Na Figura 4-10 é apresentado o diagrama de dispersão dos resultados do ensaio de resistência à compressão simples dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário.

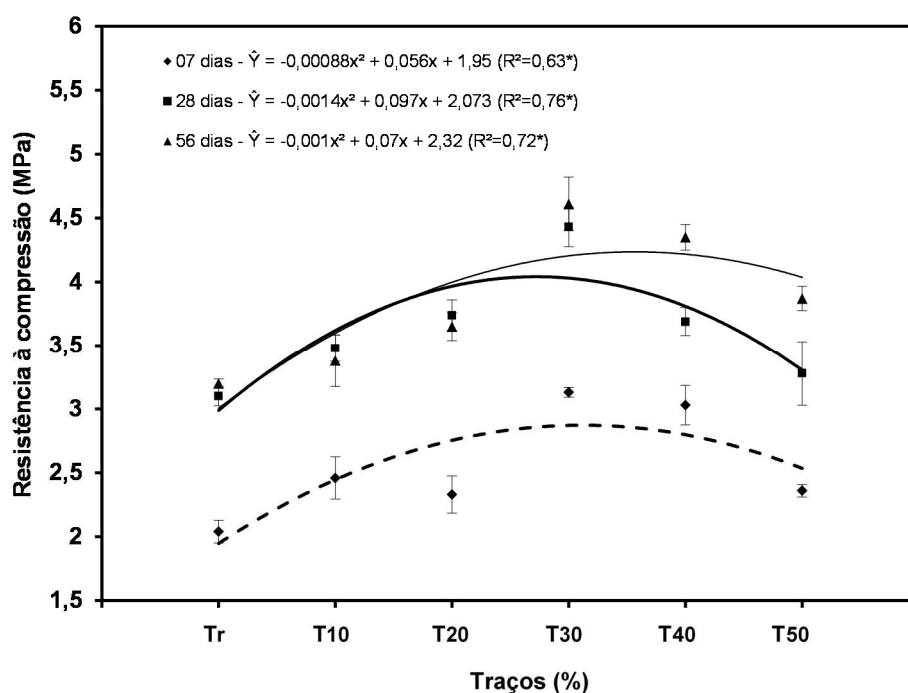


Figura 4-10: Dispersão dos resultados de resistência à compressão simples

Pela Figura 4-10 pode ser verificada a influência do tempo de cura sobre os parâmetros de resistência à compressão dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário. Os blocos ensaiados aos sete dias de cura apresentaram menor resistência se comparados às idades de 28 e 56 dias de cura. Para os blocos curados aos 28 dias, o ganho na resistência foi equivalente a uma média aproximada de 40% se comparado aos blocos curados aos sete dias. Vale destacar que a NBR 10834 (ABNT, 2013) recomenda que os corpos-de-prova sejam ensaiados aos 28 dias de cura, o que garante que os blocos atinjam a resistência desejada. Já para os blocos que foram

ensaiados aos 56 dias de cura, os resultados apresentaram uma leve tendência no ganho de resistência.

É possível verificar na Figura 4-10, para todos tempos de cura, a influência do resíduo calcário nos parâmetros de resistência a compressão dos blocos. Foi comprovado através da uniformidade dos resultados de resistência à compressão para todas as idades, que o traço T<sub>30</sub> apresentou os maiores valores de resistência mecânica, já os resultados da análise de médias indicaram que o traço T<sub>40</sub> se comportou melhor nas idades de 7 e 56 dias, para todas as idades verificou-se que ocorreu uma perda na resistência mecânica com incorporações superiores a 50% de resíduo. Como já explicado anteriormente, esse comportamento do ganho de resistência pode ser descrito por um melhor empacotamento da matriz, o que ocasiona uma redução da porosidade aberta do material devido ao efeito filler do resíduo, comprovado anteriormente pelo ensaio de absorção de água. Já a queda da resistência mecânica pode ser atribuída a desestabilização granulométrica da matriz, e que também são confirmadas pelos ensaios de absorção de água e massa específica aparente.

Se analisados simultaneamente os resultados dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e massa específica aparente, pode ser verificada uma relação bem destacada entre os resultados, de forma que o aumento da resistência mecânica está ligado diretamente a um aumento da massa específica aparente e uma baixa absorção de água. Amaral (2016), Llajaruna (2016), Junior (2011), dentre outros autores que estudaram o solo-cimento para a confecção de blocos, verificaram que a resistência mecânica está ligada diretamente à absorção de água, de modo que quanto menor é a absorção de água, maior é a resistência mecânica.

#### **4.2.4 Durabilidade**

O ensaio de durabilidade por molhagem e secagem foi realizado com os blocos de solo-cimento e resíduo calcário seguindo as prescrições da NBR 13554 (ABNT, 2012), sendo ensaiados aos sete dias de cura, durante 12 dias, totalizando seis ciclos de molhagem e secagem, nos quais os resultados obtidos apresentaram uma perda de massa inferior ao limite de 10%.

A Tabela 4.9 apresenta os resultados da perda de massa obtidos no ensaio de durabilidade para os diferentes traços estudados, em que pode ser observado que ocorreu efeito de tratamento quadrático com a adição do resíduo calcário na mistura, cuja menor perda de massa foi estimada para um  $X_v = 33,75\%$ , correspondente ao traço T<sub>30</sub>, que não difere significativamente dos traços T<sub>20</sub>, T<sub>40</sub> e T<sub>50</sub>, conforme pode ser observado, com grau de confiabilidade de 98%, na Figura 4-11.

Tabela 4.9: Valores médios de perda de massa dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário para os diferentes traços.

V	Traços						Equação	Teste t		R <sup>2</sup>	X <sub>v</sub>	C <sub>v</sub>
	T <sub>r</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>20</sub>	T <sub>30</sub>	T <sub>40</sub>	T <sub>50</sub>	$\hat{Y} = B_2x^2 + B_1x + B_0$	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>			
PM	7,25A (±0,37)	6,09B (±0,10)	5,60BC (±0,20)	4,84C (±0,75)	5,10BC (±0,69)	5,55BC (±0,34)	$\hat{Y} = 0,002x^2 - 0,135x + 7,27$	-7,27*	5,58*	0,98*	33,75	8,60

Legenda: V – Variável; PM – Perda de Massa. Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na linha e dentro dos tempos de cura, não diferem entre si segundo o teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ; DMS=0,223); (\*) Efeito significativo ( $P \leq 0,05$ ) para a contribuição dos termos de B<sub>1</sub> e B<sub>2</sub> ao modelo de regressão, segundo o Teste t-Student; (\*) Efeito significativo ( $P \leq 0,05$ ) para o coeficiente de regressão (R<sup>2</sup>), segundo o Teste F e (ns) Efeito não significativo.

Através do gráfico de dispersão (Figura 4-11) pode ser observado que a incorporação do resíduo calcário na mistura de solo-cimento obteve benefícios nos parâmetros de perda de massa do material, em que adições superiores a 20% de resíduo obtiveram os menores índices de perda de massa dos blocos se comparado com os demais traços inferiores a 20%. Góis (2012) afirma que a perda de massa está relacionada a algumas variáveis relativas de moldagem, como a força de compactação e peso específico obtido na estabilização mecânica das composições, portanto, conforme observado na Figura 4-8, os maiores resultados de massa específica aparente foram obtidos para os traços T<sub>30</sub>, T<sub>40</sub> e T<sub>50</sub>.

Lima *et al.* (2010) estudaram a durabilidade de tijolos de solo-cimento e resíduo do corte do granito, com incorporação de 30%, 40% e 50% de resíduo em substituição parcial do solo. Observaram que a incorporação de até 30% do resíduo na mistura, apresentou uma menor perda de massa no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem, o que refletiu em baixa absorção de água e um aumento da resistência mecânica se comparado aos demais traços.

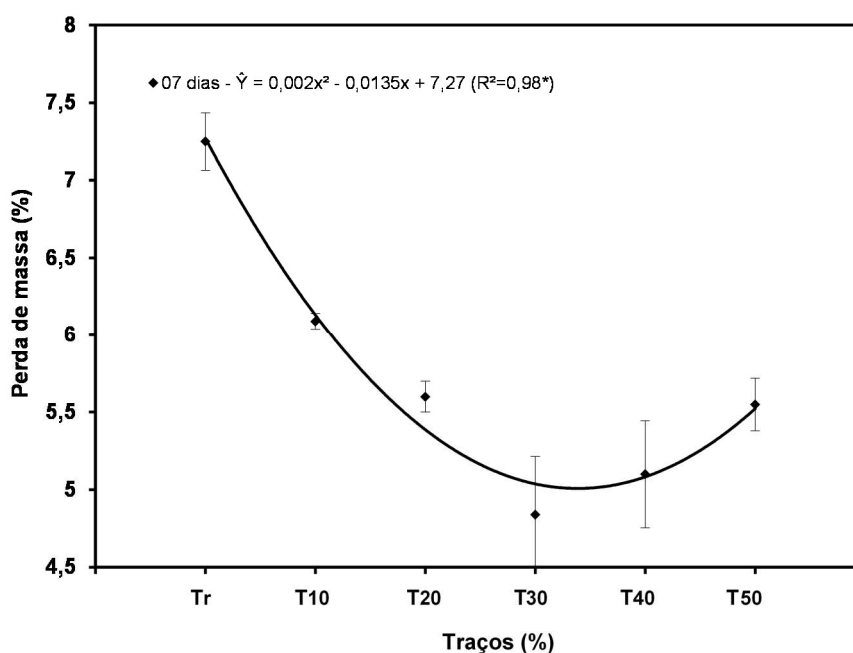


Figura 4-11: Dispersão da perda de massa pelo ensaio de durabilidade.

A fim de obter mais um parâmetro para avaliar melhor a degradação dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário, foi adicionado o ensaio de resistência à compressão a esta metodologia, que consistiu em ensaiar aos 28 dias de cura a resistência à compressão dos blocos que passaram pelo processo de durabilidade (degradação acelerada) e compará-los aos blocos ensaiados à compressão que não passaram pelo processo de degradação, também aos 28 dias de cura.

É possível observar através da Tabela 4.10 os resultados do ensaio de resistência à compressão dos blocos degradados. Destaca-se através do teste t-Student o efeito não significativo para contribuição do termo B2 na equação, o que resultou em tratamento linear, com confiabilidade de 77%, que melhor descreveu o efeito do resíduo calcário nos blocos como pode ser observado na Figura 4-12.

Pode ser verificado através do diagrama de dispersão do ensaio de resistência à compressão dos blocos degradados (Figura 4-12), que os pontos referentes aos valores obtidos de resistência à compressão não se ajustam perfeitamente ao modelo matemático proposto. Essa divergência é devida ao fato do fenômeno que está em estudo não ser puramente matemático, mas sujeito às influências que acontecem ao acaso.

Tabela 4.10: Valores médios de resistência à compressão dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário submetidos à degradação e não submetidos à degradação para os diferentes traços.

V	Traços						Equação	Teste t		R <sup>2</sup>	Xv	Cv
	T <sub>r</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>20</sub>	T <sub>30</sub>	T <sub>40</sub>	T <sub>50</sub>	$\hat{Y} = B_1x + B_0$	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>			
R	5,13B (±0,76)	5,33B (±0,32)	5,47B (±0,27)	6,88A (±0,52)	6,69A (±0,48)	6,63A (±0,22)	$\hat{Y} = 0,0371x + 5,09$	6,71*	-	0,77*	-	7,77

Legenda: V – Variável; R – Resistência Mecânica. Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na linha e dentro dos tempos de cura, não diferem entre si segundo o teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ; DMS=0,821); (\*) Efeito significativo ( $P \leq 0,05$ ) para a contribuição dos termos de B1 e B2 ao modelo de regressão, segundo o Teste t-Student; (\*) Efeito significativo ( $P \leq 0,05$ ) para o coeficiente de regressão ( $R^2$ ), segundo o Teste F e (ns) Efeito não significativo.

A partir da Figura 4-12, de modo geral, verificou-se um expressivo ganho de resistência mecânica para os blocos que foram submetidos à degradação, chegando a apresentar uma diferença de até 100% a mais no ganho de resistência à compressão.

Através da comparação dos resultados foi possível identificar que o traço T<sub>30</sub> apresentou, para os dois ensaios, o maior valor de resistência encontrado, porém analisando o teste tukey é possível notar que não ocorreu diferenciação de médias entre os traços T<sub>30</sub>, T<sub>40</sub> e T<sub>50</sub>, indicando que a incorporação de até 50% do resíduo calcário se mostrou viável em idades de cura mais avançadas.

Segundo Góis (2012) o ganho de resistência pode ser justificado a curto prazo pelas reações cimentícias provenientes da hidratação dos compostos  $C_2S$  e  $C_3S$  presentes no cimento Portland que contribuem para o ganho na resistência e maior densificação, conforme o gel de C-S-H cristaliza e ocupa os vazios da mistura.

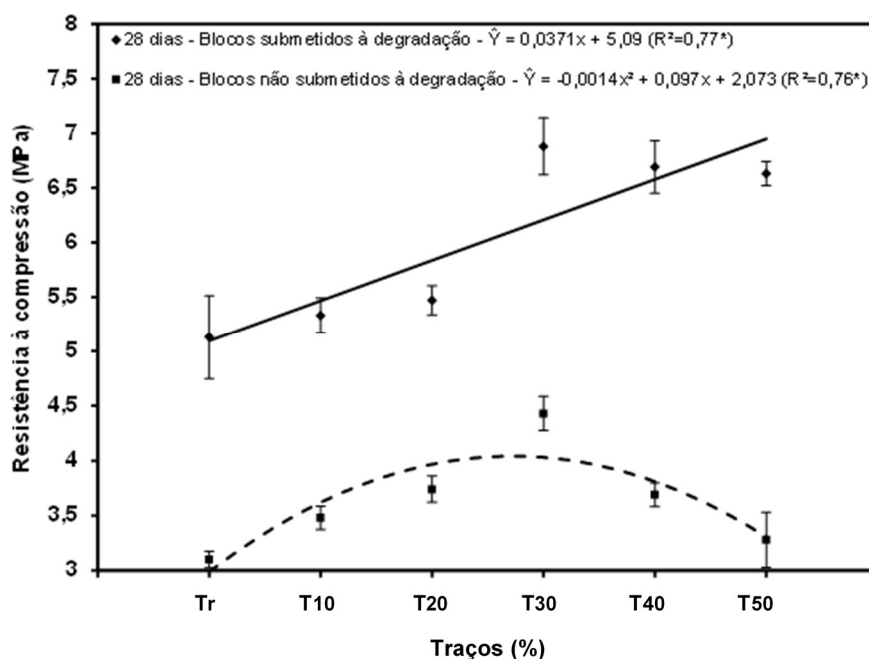


Figura 4-12: Comparativo da dispersão da resistência à compressão dos blocos submetidos à degradação e os blocos não submetidos à degradação.

Pode ser observado também uma relação entre a metodologia aplicada pelo ensaio de durabilidade por molhagem e secagem segundo a NBR 13554 (ABNT, 2012) e o processo de cura térmica para produtos cimentícios. Para o ensaio de durabilidade são realizados seis ciclos de 48 h de molhagem e secagem, sendo 5 h de imersão em água e 42 h secos em estufa à uma temperatura de 71°C. A cura térmica para produtos cimentícios ocorre com temperaturas em até 80°C, para não causar modificações na microestrutura do concreto (CAMARINI E CINCOTTO, 1995).

O processo de cura térmica funciona como um acelerador das reações de hidratação do cimento. De acordo com Camarini e Cincotto (1995), é considerada a cura mais eficiente; nela o produto cimentício é mantido em altas temperaturas com a atmosfera saturada de vapor, garantindo a umidade necessária para que ocorra a aceleração no ganho de resistência pelo aquecimento.



De acordo com a lei de Arrhenius, o aumento da temperatura conduz ao aumento da hidratação do cimento e, por conseguinte, o aumento da resistência mecânica nas primeiras idades (DESCHNER *et al.*, 2013). Neville (1997) destacou que uma temperatura mais alta durante e depois do contato inicial entre o cimento e a água levam a uma redução do período de latência. Bingöl e Tohumcu (2013) complementam que, com a elevação da temperatura de cura, aumenta-se a velocidade de dissolução dos constituintes que permaneceram anidros no clínquer.

Os grãos de clínquer não hidratados, chamados de grãos anidros, podem ser encontrados na microestrutura da pasta de cimento Portland, mesmo depois do período de hidratação. Esse fenômeno é decorrente do limitado espaço disponível entre as partículas, que fazem com que ocorra uma precipitação muito próxima das partículas de clínquer em hidratação e, por consequência, algumas partículas sofrem o processo de hidratação, *in situ*, formando um produto denso com morfologia semelhante à partícula original (SALUM, 2016).

Oliveira *et al.* (2006) estudaram a durabilidade de compósitos de cimento Portland produzidos com agregados reciclados da construção civil e observaram o ganho de resistência mecânica dos corpos-de-prova que foram ensaiados a durabilidade em comparação com os que não foram submetidos ao ensaio de durabilidade. Atribuíram os resultados as condições de ensaio (devido ao aumento da temperatura de 71 °C) acelerarem as reações de hidratação do cimento anidro ainda presentes nas amostras, resultando em um elevado ganho de resistência à compressão.

Lima *et al.* (2010) produziram tijolos de solo-cimento e resíduo de corte de granito, verificando a resistência à compressão dos tijolos que passaram pelo ensaio de durabilidade em comparação com os tijolos que não passaram pelo ensaio de durabilidade e constataram que para o traço contendo 40% de incorporação de resíduo o valor de resistência à compressão aumentou em 25%, se comparado aos tijolos que não foram submetidos aos ciclos de degradação.

Sobre a cura destaca-se que Palma *et al.* (2012) analisaram a influência de sistemas de cura de blocos de concreto na resistência à compressão e verificou que o sistema de cura térmica é mais eficiente para o desenvolvimento mecânico que o

sistema de cura natural, observando que os valores de resistência mecânica para os corpos-de-prova curados pelo processo de cura térmica apresentaram a média de 70% a mais no ganho de resistência à compressão se comparado ao processo de cura natural.

É apresentado na Figura 4-13 como o grau de hidratação do cimento influencia no percentual de poros capilares presentes na estrutura de um compósito. É possível verificar que, quanto maior o grau de hidratação, maior será a quantidade de produtos que se formam e menor a quantidade de poros capilares. É importante mencionar que o grau de hidratação do cimento Portland é influenciado pelas condições de cura durante seu processo de hidratação, podendo ser destacado a temperatura e a umidade (TUTIKIAN E HELENE, 2011).

Por fim, o ganho na resistência à compressão dos blocos que foram ensaiados a durabilidade pode ser justificado, como previa a literatura, pelas reações de hidratação do cimento, que tendem a sofrer aceleração quando submetidas a elevadas temperaturas durante o processo de cura, ocasionando então o aumento do teor de hidratos, que contribuem na diminuição da porosidade e no aumento na resistência à compressão.

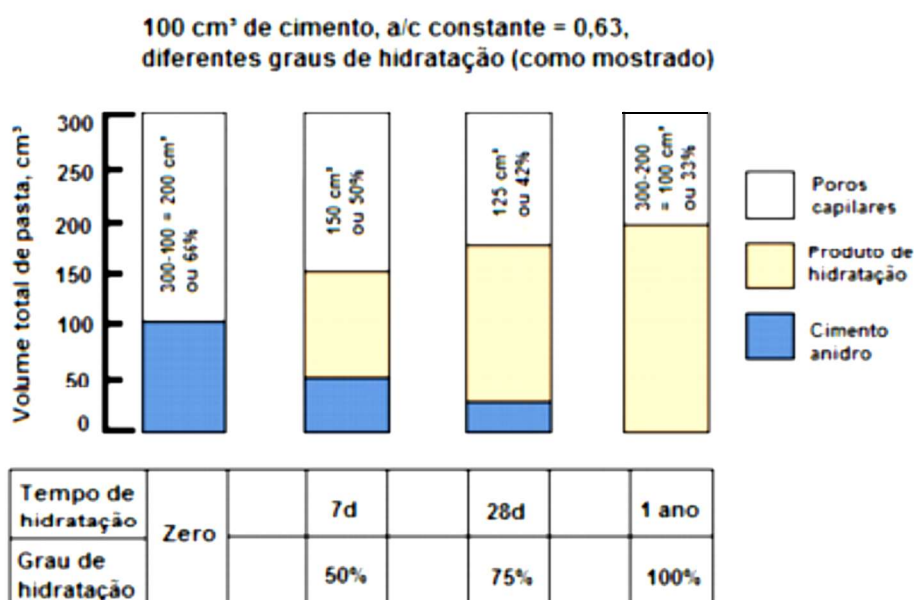


Figura 4-13: Modelo de Powers para variação na porosidade de acordo com o grau de hidratação do cimento.

Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados experimentais obtidos neste trabalho pode ser concluído que:

- O solo utilizado segundo sua distribuição granulométrica é tipicamente areno argiloso, por apresentar 49% de fração areia e 38% de fração argila. É quimicamente predominante pelos compostos sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), possuindo uma perda ao fogo de 7,25%. Do ponto de vista mineralógico, apresenta em sua composição a caulinita, quartzo, anortita, ortoclásio e a muscovita;
- O resíduo calcário do beneficiamento do mármore é constituído, segundo sua granulometria de 73,9% de fração silte, 19,9% de fração argila e 5,9% de fração areia fina. Já quimicamente é, principalmente, composto por óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), que são elementos característicos das rochas carbonáticas, possuindo uma perda ao fogo de 33,33%. Sua análise mineralógica apresenta como os principais minerais calcita e dolomita;
- Destacando o ensaio físico experimental de compactação estática para obtenção do teor de umidade, observou-se a diferença com o ensaio de compactação Proctor Normal, cujos resultados indicaram maior confiabilidade em se utilizar o método estático para obtenção do teor de umidade de moldagem;
- Verificou-se através da incorporação do resíduo calcário em substituição parcial do solo numa mistura de solo-cimento para a fabricação dos blocos de encaixe que o teor de 40% de resíduo calcário na mistura apresentou, de forma geral, os melhores resultados de massa específica, absorção de água, resistência à compressão e durabilidade, porém incorporações de até 50% do resíduo calcário na mistura se mostram convenientes para produção de blocos de encaixe prensados com as características que eles foram fabricados;
- Através do ensaio de resistência à compressão simples dos blocos que foram ensaiados a durabilidade, foi possível observar, de forma análoga, a influência do tipo de cura sobre os parâmetros de resistência mecânica do bloco, em que através de um processo de degradação acelerada (molhagem e secagem em estufa) verificou-se o elevado ganho na resistência mecânica dos blocos.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos ao final deste trabalho, algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas:

- Avaliar a influência do resíduo calcário em misturas de solo-cimento utilizando outros solos da região de Campos de Goytacazes;
- Produzir blocos de solo-cimento e resíduo calcário com outros tipos de cimento Portland;
- Avaliar os diferentes tipos de cura para a produção bloco de solo-cimento e resíduo calcário nos parâmetros de absorção de água, resistência à compressão e durabilidade;
- Analisar a influência de diferentes forças de prensagem nos parâmetros de densidade, absorção de água e resistência à compressão dos blocos;
- Produzir blocos de solo-cimento e resíduo calcário visando aumentar o teor de resíduo na mistura com o aumento do teor de cimento Portland;
- Realizar um estudo do potencial econômico do uso dos blocos de solo-cimento e resíduo calcário para aplicação na construção civil.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### 7.1 Referências de normas técnicas

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991) Cimento Portland com Alta Resistência Inicial: NBR 5733. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995) Rochas e Solos: terminologia: NBR 6502. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) tijolo maciço de solo-cimento: NBR 8491. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Solo Cimento - Ensaio de Compactação: NBR 12023. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Solo Cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos: NBR 12025. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 12024. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Solo-cimento - Determinação da absorção d'água: NBR 13555. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012) Solo-cimento — Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem — Método de ensaio: NBR 13554. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013) Bloco vazado de solo-cimento. Especificação. Método de ensaio: NBR 10834. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013) Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica: NBR 10833. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio: NBR 13583. Rio de Janeiro

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015) Materiais pozolânicos – Requisitos: NBR 12653. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) Determinação do limite de plasticidade - Método de ensaio: NBR 7180. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017) Análise Granulométrica - Solo: NBR 7181. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017) Determinação do limite de liquidez - Método de ensaio: NBR 6459. Rio de Janeiro.

## 7.2 Referência de obras citadas

ABIKO, A. K. (1983) *Solo-cimento: tijolos, blocos e paredes monolíticas*. In: Construção São Paulo, n.1863. São Paulo: Pini.

ALMEIDA, T. F.; LEITE, F. G. H.; HOLANDA, J. N. F. (2015) *Caracterização de resíduo de pó de mármore para aplicação em materiais cerâmicos*. I encontro de Engenharia, Ciência de Materiais e Inovação do Estado do Rio de Janeiro, 5p.

ALVES, R. P.; SEGANTINI, A. A. S. (2014) *Estudo da utilização de resíduos de mármore na composição de tijolos prensados de solo-cimento*. In: Congresso de Iniciação Científica da Unesp, Ed.26., 2014, Ilha Solteira. Anais... Ilha Solteira: Unesp, 2014.

AMARAL, M. C. (2016) *Avaliação dos efeitos da incorporação de resíduo de lama de cal nas propriedades e microestrutura de uma mistura solo-cimento*. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS (2017) - *Informe 01/2017*. Brasília - DF.

Associação Brasileira De Cimento Portland – ABCP (1986) *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensa manual*. São Paulo.

Associação Brasileira De Cimento Portland - ABCP (2002) *Guia básico de utilização do cimento Portland*. BT-106, 7. ed., São Paulo. 28p.

AZAMBUJA, M. A. (1979) *Geologia aplicada a solo-cimento*. Publicações ABCP: São Paulo.

BAKER, C. N. (1954) *Strength of soil-cement as a function of degree of mixing*. Highway Research Board, Washington, Bulletin 98, p. 33-52.

BILGIN, N.; YEPREM, A. H.; ARSLAN, S.; BILGIN, A.; GUNAY, E.; MARSOGLU, M. (2012) *Use of waste marble powder in brick industry*. Construction and Building Materials, 29, p. 449–457.

BINGÖL, A. F.; TOHUMCU, I. (2013) *Effects of diferente curing regimes on the compressive strenght properties of self compacting concrete incorporating fly ash and sílica fume*. Materials, n. 51, p. 12–18.

BLÜCHER, E. (1951) *Mecânica dos solos para engenheiros rodoviários – volume I*. São Paulo, Blücher.

BROOKS, R., UDOEYO, F., TAKKALAPELLI, K. (2011) *Geotechnical Properties of Problem Soils Stabilized with Fly Ash and Limestone Dust in Philadelphia*. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 23, n. 5, 711–716 p.

CAMARINI, G.; CINCOTTO, M. A. C. (1995) *Cura térmica de argamassas e concretos por agentes térmicos – Aspectos Gerais*. In: Seminário Nacional sobre Desenvolvimento Tecnológico dos Pré-moldados e Autoconstrução. FAU-USP, Anais, p.141-51.

CANCIAN, A. M. (2013) *Influência do teor de umidade, porosidade e do tempo de aplicação na mistura solo-cimento para pavimento rodoviário de um solo da bacia do Paraná*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Londrina – Paraná.

CASTRO, M. A. M.; COSTA, G. F.; BORBA, C. S.; NETO, F. E.; RABELO, A. A. (2016) *Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos de solo-cimento formulados*.

Centro Brasileiro De Construções e Equipamentos Escolares - CEBRACE (1981) *Solo-cimento na construção de escolas - SC-01* (Sistema Construtivo 02). 2. ed. Rio de Janeiro, MEC/CEBRACE, 39 p.

Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - CEPED (1999) *Manual de construção com solo cimento*. 4. ed. Camaçari. 114 p.

DESCHNER, F. LOTHENBACH, B. WINNEFELD, F. NEUBAUER, J. (2013) *Effect of temperature on the hydration of Portland cement blended with siliceous fly ash*. Cement and concrete research, n. 52, p.169 – 181.

Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (2015) *Sumário Mineral 2015*. V 35, Brasília – DF.

DIAS, S. M. F. J. J. (2012) *Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Nova de Lisboa – Portugal.

ENTEICHE, A. A. (1963) *Suelo-cemento, su aplicacion en la edificacion*. Bogotá: CINVA.

FARIA, J. R. G. (1990) *Unidade de produção de tijolos de solo estabilizado*. Dissertação (Mestrado) – São Carlos – SP, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FELT, E. J. (1955) *Factors influencing physical properties of soil-cement mixtures*. Portland Cement Association, p.138-162.

FERRAZ, R. L.; BELICANTA, A.; GUTIERREZ, N. H. M. (2001) *Estudo comparativo de alguns métodos de dosagem de misturas de solo-cimento*. In: ENTECA 2000. Maringá. Anais.

FERRAZ JUNIOR, F. A. C. (1995) *Equipamentos modernos para a produção de tijolos de terra prensada*. In: Anais do Workshop Arquiteutura de Terra. São Paulo: NUTAU-FAUUSP, p.163-179.

FERREIRA, R. C. (2003) *Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e mini-panéis de terra crua tratada com aditivos químicos*. Tese (Doutorado em construção Rural e Ambiência) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.



FILHO, J. H; SOUZA, D. J; MEDEIROS, M. H. F; PEREIRA, E; PORTELLA, K. F (2015) *Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores*. Cerâmica, 61, 168-177.

FIQUEROLA, V. (2004) *Alvenaria de solo-cimento*, Revista Técnica, São Paulo: Pini, n. 85.

GÓIS, L. C. (2012) *Estudo da incorporação de cal em composições binárias de solo-cimento para produção de tijolos maciços*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Natal – RN, Centro de Ciências Exatas e da Terra – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

GRANDE, F. M. (2003) *Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com adição de sílica ativa*. São Carlos: EESC-USP.

GRIMER, F. J. (1957) *The effect of pulverization on the ornality of clay cement*. Proc. of the Fourth International Conference on Soil Mechanics on Foundation Engineering, London.

Highway Research Board – HRB (1954) *Strength of soil-cement as a function of degree of mixing*. Highway Research Board, Washington, Bulletin 98, p. 33-52.

HOLANDA, J. N. F.; GOMES, A. E. P.; MELO, E. B. de; MARANHÃO, R. J. L.; & outros. (1987) *Calcários de Pernambuco: rochas para fins industriais*, p. 29. Minérios de Pernambuco. Recife – PE.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. (1972) *Soil stabilization: principles and practice*. Butterworths, Sydney – Melbourne – Brisbane.

JÚNIOR, D. S. N. (2016) *Produção de blocos prensados e de encaixe com pó de pedra do beneficiamento de rochas calcárias*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

KUMAYAMA, R.; ALCÂNTARA, M. A. M.; CRUZ, W. S.; SEGANTINI, A. A. S.; PINHEIRO, L. M. (2014) *Estudo das propriedades mecânicas do concreto auto adensável com o emprego de pó de mármore e substituição parcial dos agregados por pérolas de poliestireno expandido*. In: Congresso Brasileiro de Concreto, Ed. 56., 2014, Natal. Anais... Natal: Ibracon, 2014.

LIMA, F. C.; MELO, R. A. (2014) *Estabilização de solos com utilização de agregados de rochas calcárias para uso em camadas de pavimentos*. XXVIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte. 28, Curitiba -PR.

LIMA, O. C. R.; NEVES, A. G.; CARVALHO, Q. B. J. (2010) *Durabilidade de tijolos de solo-cimento produzidos com resíduo de corte de granito*. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 5.2, 2010, 24-31p.

LLAJARUNA, M. A. V. (2016) *Estudo do solo-cimento auto adensável para a fabricação de tijolos de mármore e resíduo de construção*. Dissertação (Engenharia civil) Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP, 75p.

MAURY, B. M.; BLUMENSCHNEIN, N.R. (2012) *Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente*. Sustentabilidade em Debate - Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, jan/jun 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (1994) *Concreto: estruturas, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini.

MERCADO, M. C. (1990) *Solo-cimento: alguns aspectos referentes à sua produção e utilização em estudo de caso*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – São Paulo – SP, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de São Paulo.

MINKE, G. (1998) *Earth construction handbook: the building material earth in modern architecture*. Southhampton, ill. Graph. 210 p.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B. (2011) *Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação*. Rem: Revista Escola de Minas, vol. 64, núm. 2, abril-junio, 2011, pp. 147- 154.

MOURA, P. R. M. (1987) *Estudo comparativo do comportamento do solo-cimento feito com um solo laterítico e um solo saprolítico*. Dissertação (Mestrado) – São Paulo – SP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

NEVILLE, A. M. (1997) *Propriedades do Concreto*. 2ª Edição. São Paulo/SP. Edit. PINI.

OLIVEIRA, R. J.; AMARAL, G. A.; SCHNEIDER, M. R. (2014) *Incorporação de resíduos sólidos de torneiras mecânicas na fabricação de tijolos solo-cimento*. Nativa, Sinop, V. 02, n. 01, 0.53-57.

OLIVEIRA, F. D.; SANTOS, S.V.; LIRA, L. H.; MELO, B. A.; NEVES, A. G. (2006) *Durabilidade de compósitos de concreto de cimento Portland produzidos com agregados reciclados da construção civil*. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 1.2, 2006, 30-36p.

PALMA, C. M.; BOSSE, M. R.; LARCHER, M. V. J.; GEALH, V. K. J. (2012) *Influência de sistemas de cura de blocos de concreto na resistência à compressão*. Anais do III Seminário de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

PINTO, C. D. S. (1998) *Propriedades dos solos*. In: HACHICH, W et al. Fundações: teoria e prática. 2. ed., p. 51-118.

PITTA, M. R. (1982) *Retração do solo-cimento*. In: Anais da Reunião Anual de Pavimentação, 17, Brasília, i1 - i67 p.

PISANI, M. A. J. P. (2004) *Execução de tijolo de solo-cimento*. In: BRUNA, G. C. Relatório de Pesquisa: Promoção do Desenvolvimento Sustentável do semiárido da Bahia. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, MackPesquisa.

POÇO, R. C. E.; BONASSI, R. (1988) *A importância de parâmetros de compactação em obras de solo-cimento*. In: Anais da Reunião Anual de Pavimentação, 23, Florianópolis, p.145-170.

Portland Cement Association - PCA (1946) *Soil-cement mixtures laboratory handbook*. Chicago, Ill. Portland Cement Association.

Portland Cement Association - PCA (1969) *Soil-cement construction handbook*. Illinois: PCA, 42p.

Rapporto Marmo e Pietrenel Mondo (2016) *XXVII Report Marble and Stones in the World* – elaborado pelo Dr. Carlo Montani.

ROCHA, A. F. (1996) *Estudo experimental sobre misturas de solo-cimento para a região de Campo Novo dos Parecis, MT*. (Dissertação de Mestrado) - São Carlos – SP, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SABBAG, P. Y. (1980) *Solo-cimento: o estudo da retração e suas implicações*. (Dissertação de Mestrado) - São Paulo, Escola Politécnica.

SALES, A. T. C.; SÁ, B. R. C.; SANTOS, D. G. (2014) *Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por pó de mármore*. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 15, Maceió, p. 2472-2481.

SALUM, L. P. (2016) *Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante*. Dissertação (mestrado em engenharia civil) Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 166p.

SANTIAGO, O. N.; OLIVEIRA, F. D.; SOUZA, A. A.; MUNIZ, S. C.; SILVA, M. M. L.; SOUZA, D. M.; (2012) *Estudo do fator água/cimento para a confecção de tijolos ecológicos de solo-cimento incorporados com resíduo gerados no beneficiamento de rochas ornamentais*. Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia - Departamento de Química, Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, Campus I, Campina Grande-PB.

SANTOS, W. J. (2012) *Argamassa de alto desempenho*. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) – Juiz de Fora – MG, Universidade Federal de Juiz de Fora

SEGANTINI, A. A. S. (2000) *Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira-SP*, Tese (Doutorado) – Campinas – SP, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 176p.

SHERWOOD, P. T. (1993) *Soil Stabilization with cement and lime: State of the Art Review*. HMSO, London.

SILVA, M. S. (2001) *A terra crua como alternativa sustentável para a produção de habitação social*. (Dissertação de Mestrado) – São Carlos – SP, Escola de Engenharia de São Carlos– Universidade de São Paulo.

SILVA, S. A. M. (1991) *Estudo da compressão simples em corpos de prova de solo-cimento e solo-cimento-serragem*. Dissertação (Mestrado) - São Carlos – SP, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SILVA, S. R. (2005) *Tijolos de solo-cimento reforçado com serragem de madeira*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Belo Horizonte – MG, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 219p.

SILVEIRA, A. (1966) *Estabilização de solos com cimento – síntese de notas de aula*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Publicação 128, p. 1-44.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2013) *Relatório Anual 2013*. Rio de Janeiro – RJ, 40 p.

SIQUEIRA, F. B. (2013) *Avaliação da incorporação de resíduo grits nas propriedades e microestrutura de tijolo solo-cimento*. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, 121 p.

SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J. N. F. (2013) *Reuse of grits waste for the production of soil-cement bricks*. Journal of Environmental Management, 131 (2013) 1 - 6 p.

SPÍNOLA, V. (2003) *Rochas ornamentais em arranjo produtivo* (No. 65). Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia.

SUTCU, M.; ALPTEKIN, H.; ERDOGMUS, E.; GENCEL, O. (2015) *Characteristics of fired clay bricks with waste marble powder addition as building materials*. Construction and Building Materials, Amsterdam, v. 82, p.1-8.

TAYLOR, H. F. W. (1997) *Cement chemistry*. 2nd ed., London: Thomas Telford.

TUTIKIAN, B. F. HELENE, P. (2011) *Dosagem dos concretos de cimento Portland*. Concreto: Ciência e Tecnologia. In: ISAIA, G. C. Edit. IBRACON. São Paulo, p. 415 - 451.

ULIANA, J. G.; BASTOS, R. S.; CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L.; RODRIGUES, J. A. (2013). *Estudo comparativo da caracterização da lama do beneficiamento de rochas ornamentais com e sem granalha de aço*. Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2013 – 55CBC.

VIEIRA, C. M. F. (2001) *Caracterização de Argilas de Campos dos Goytacazes Visando à Fabricação de Revestimento Cerâmico Semiporoso*. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. 118p.

XAVIER, G. C. (2006) *Resistência, Alterabilidade e Durabilidade de Peças Cerâmicas Vermelhas Incorporadas com Resíduo de Granito*. Tese (Doutorado em Engenharia

Civil) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

ZAIYOU, S.; HARABI, A.; HARABI, E.; GUECHI, A.; KARBOUA, N.; BENHASSINE, T.M.; ZOUAI, S.; GUERFA, F. (2016) *Sintering of anorthite based ceramics prepared from kaolin DD2 and calcite*. Cerâmica 62, p. 317-322.

## Apêndice A

As propriedades físicas, mecânicas e químicas do cimento Portland CP V-ARI estão apresentadas nas tabelas adiante.

Tabela 1.A: Propriedades Físicas do Cimento Portland CP V-ARI.

<b>Ensaio Físico</b>	<b>Limites de NBR 11578 (ABNT, 1991)</b>	<b>Resultados obtidos</b>
Finura malha nº 200 (%)	≤ 6,0	0,03
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	-	3,09
Área esp. (Blaine) (cm <sup>2</sup> /g)	≥ 3000	4327
Tempo de pega (h:min) Início	≥ 1:00	03:41
Tempo de pega (h:min) Final	≤ 10:00	04:18
Expansibilidade à quente	≤ 5,00	0,23

Fonte: Itambé – Julho/2016.

Tabela 2.A: Propriedades Mecânicas do Cimento Portland CP V-ARI.

<b>Ensaio Mecânico</b>	<b>Limites de NBR 11578 (ABNT, 1991)</b>	<b>Resultados obtidos</b>
Resistência 1 dia (MPa)	≥ 14	22,3
Resistência 3 dias (MPa)	≥ 24	39,7
Resistência 7 dias (MPa)	≥ 34	45,0
Resistência 28 dias (MPa)	-	52,1

Fonte: Itambé – Julho/2016.

Tabela 3.A: Composição química do Cimento Portland CP V-ARI.

<b>Composição Química</b>	<b>Limites de NBR 11578 (ABNT, 1991)</b>	<b>Resultados obtidos</b>
Perda de fogo (%)	≤ 4,5	3,35
SiO <sub>2</sub> (%)	-	18,87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-	4,24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-	2,72
CaO (%)	-	60,73
MgO (%)	≤ 6,5	4,16
SO <sub>3</sub> (%)	≤ 3,5	3,0
CO <sub>2</sub> (%)	-	0,71
CaO Livre	-	0,65
Resíduo insolúvel	≤ 1,0	0,84

Fonte: Itambé – Julho/2016.

## Apêndice B

O critério de Tamanho Mínimo de Lote (TML) utilizado nesta pesquisa considerou a confiabilidade de 95% ( $r = 0,05$ ), a distribuição de *t-Student* e a distribuição normal da amostragem.

Tabela 1.B: Resultados do TML para p ensaio de massa específica aparente.

Cura	Traço	Nº CP	t-Student (n-1)	Média	Desvio Padrão	no	n
1 dia	T <sub>r</sub>	5	2,132	1,68	0,01	1	1
	T <sub>10</sub>	5	2,132	1,69	0,01	1	1
	T <sub>20</sub>	5	2,132	1,70	0,02	1	1
	T <sub>30</sub>	5	2,132	1,71	0,01	1	1
	T <sub>40</sub>	5	2,132	1,70	0,01	1	1
	T <sub>50</sub>	5	2,132	1,68	0,01	1	1

Tabela 2.B: Resultados do TML para o ensaio de absorção de água.

Cura	Traço	Nº CP	t-Student (n-1)	Média	Desvio Padrão	no	n
7 dias	T <sub>r</sub>	4	2,356	17,26	0,46	2	2
	T <sub>10</sub>	4	2,356	15,65	0,50	2	2
	T <sub>20</sub>	4	2,356	15,36	1,04	4	2
	T <sub>30</sub>	4	2,356	16,43	0,77	3	2
	T <sub>40</sub>	4	2,356	17,10	0,56	2	2
	T <sub>50</sub>	4	2,356	17,59	0,88	3	2
28 dias	T <sub>r</sub>	4	2,356	15,30	0,31	1	1
	T <sub>10</sub>	5	2,132	13,97	0,80	3	2
	T <sub>20</sub>	5	2,132	13,70	0,98	4	3
	T <sub>30</sub>	5	2,132	12,64	1,00	4	3
	T <sub>40</sub>	5	2,132	13,69	0,81	3	2
	T <sub>50</sub>	5	2,132	17,29	1,30	4	3
56 dias	T <sub>r</sub>	5	2,132	14,43	0,78	3	2
	T <sub>10</sub>	5	2,132	13,98	0,91	3	2
	T <sub>20</sub>	4	2,356	12,74	0,28	2	2
	T <sub>30</sub>	5	2,132	13,19	0,82	3	2
	T <sub>40</sub>	5	2,132	14,17	0,59	2	2
	T <sub>50</sub>	5	2,132	16,94	0,56	2	2



Tabela 3.B: Resultados do TML para o ensaio de resistência à compressão simples.

<b>Cura</b>	<b>Traço</b>	<b>Nº CP</b>	<b>t-Student (n-1)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>no</b>	<b>n</b>
7 dias	Tr	5	2,132	2,04	0,18	4	3
	T10	5	2,132	2,46	0,33	6	3
	T20	5	2,132	2,33	0,29	6	3
	T30	4	2,356	3,13	0,08	2	2
	T40	5	2,132	3,03	0,31	5	3
	T50	4	2,356	2,84	1,07	18	4
28 dias	Tr	5	2,132	3,10	0,15	3	2
	T10	6	2,015	3,48	0,21	3	2
	T20	6	2,015	3,74	0,24	3	2
	T30	5	2,132	4,73	0,31	3	2
	T40	5	2,132	3,69	0,22	3	2
	T50	6	2,015	3,28	0,50	7	4
56 dias	Tr	5	2,132	3,20	0,07	1	1
	T10	6	2,015	3,38	0,41	5	3
	T20	5	2,132	3,65	0,22	3	2
	T30	6	2,015	4,80	0,42	4	3
	T40	6	2,015	4,35	0,21	2	2
	T50	5	2,132	3,87	0,19	3	2

Tabela 4.B: Resultados do TML para o ensaio de durabilidade.

<b>Cura</b>	<b>Traço</b>	<b>Nº CP</b>	<b>t-Student (n-1)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>no</b>	<b>n</b>
7 dias	Tr	5	2,132	7,25	0,37	3	2
	T10	4	2,353	6,09	0,10	1	1
	T20	4	2,353	5,60	0,20	2	2
	T30	5	2,132	4,84	0,75	7	3
	T40	5	2,132	5,10	0,69	6	3
	T50	5	2,132	5,55	0,34	3	2

Tabela 5.B: Resultados do TML para o ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova ensaiados a durabilidade.

<b>Cura</b>	<b>Traço</b>	<b>Nº CP</b>	<b>t-Student (n-1)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>no</b>	<b>n</b>
28 dias	Tr	6	2,015	5,13	0,76	7	4
	T10	6	2,015	5,33	0,32	3	2
	T20	6	2,015	5,47	0,27	3	2
	T30	6	2,015	6,88	0,52	4	3
	T40	6	2,015	6,69	0,48	3	2
	T50	6	2,015	6,63	0,22	2	2



Tabela 2.2.C: Resultados do Critério de Chauvenet para o ensaio de absorção de água aos 28 dias de cura.

Dados	<b>T<sub>r</sub></b>	<b>T<sub>10</sub></b>	<b>T<sub>20</sub></b>	<b>T<sub>30</sub></b>	<b>T<sub>40</sub></b>	<b>T<sub>50</sub></b>
Valor máximo	<b>15,66</b>	14,83	14,73	14,06	14,61	18,61
Valor mínimo	<b>13,62</b>	12,90	12,34	11,33	12,80	15,54
x <sub>m</sub> (média)	<b>14,97</b>	13,97	13,70	12,64	13,69	17,29
S <sub>x</sub> (desvio padrão)	<b>0,80</b>	0,80	0,98	1,00	0,81	1,30
N° de amostras	<b>5</b>	5	5	5	5	5
<b>DR<sub>mín</sub></b>	<b>1,69</b>	1,35	1,39	1,31	1,10	1,35
<b>DR<sub>máx</sub></b>	<b>0,87</b>	1,08	1,04	1,42	1,14	1,01
<b>DR<sub>0</sub> (tabelado)</b>	<b>1,65</b>	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Hipótese de aceitação	<b>H<sub>1</sub></b>	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>

Tabela 2.2.1.C: Resultados do Critério de Chauvenet para o ensaio de absorção de água aos 28 dias de cura – traço Tr.

Dados	<b>T<sub>r</sub></b>
Valor máximo	15,66
Valor mínimo	14,93
x <sub>m</sub> (média)	15,30
S <sub>x</sub> (desvio padrão)	0,31
N° de amostras	4,00
<b>DR<sub>mín</sub></b>	1,22
<b>DR<sub>máx</sub></b>	1,18
<b>DR<sub>0</sub> (tabelado)</b>	1,54
Hipótese de aceitação	H <sub>0</sub>

Tabela 2.3.C: Resultados do Critério de Chauvenet para o ensaio de absorção de água aos 56 dias de cura.

Dados	<b>T<sub>r</sub></b>	<b>T<sub>10</sub></b>	<b>T<sub>20</sub></b>	<b>T<sub>30</sub></b>	<b>T<sub>40</sub></b>	<b>T<sub>50</sub></b>
Valor máximo	15,14	15,17	<b>14,31</b>	13,97	14,72	17,55
Valor mínimo	13,44	13,11	<b>12,43</b>	11,99	13,31	16,13
x <sub>m</sub> (média)	14,43	13,98	<b>13,05</b>	13,19	14,17	16,94
S <sub>x</sub> (desvio padrão)	0,78	0,91	<b>0,74</b>	0,82	0,59	0,56
N° de amostras	5	5	<b>5</b>	5	5	5
<b>DR<sub>mín</sub></b>	1,26	0,95	<b>0,84</b>	1,48	1,47	1,43
<b>DR<sub>máx</sub></b>	0,92	1,31	<b>1,69</b>	0,95	0,93	1,09
<b>DR<sub>0</sub> (tabelado)</b>	1,65	1,65	<b>1,65</b>	1,65	1,65	1,65
Hipótese de aceitação	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	<b>H<sub>1</sub></b>	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>

Tabela 2.3.1.C: Resultados do Critério de Chauvenet para o ensaio de absorção de água aos 56 dias de cura – traço T20.

<b>Dados</b>	<b>T20</b>
Valor máximo	13,10
Valor mínimo	12,43
$x_m$ (média)	12,74
$S_x$ (desvio padrão)	0,28
N° de amostras	4
<b><i>DR<sub>mín</sub></i></b>	1,09
<b><i>DR<sub>máx</sub></i></b>	1,27
<i>DR<sub>0</sub> (tabelado)</i>	1,54
Hipótese de aceitação	H <sub>0</sub>

Tabela 3.1.C: Resultados do Critério de Chauvenet para o ensaio de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura.

<b>Dados</b>	<b>T<sub>r</sub></b>	<b>T<sub>10</sub></b>	<b>T<sub>20</sub></b>	<b>T<sub>30</sub></b>	<b>T<sub>40</sub></b>	<b>T<sub>50</sub></b>
Valor máximo	2,18	2,82	2,67	<b>3,21</b>	3,33	<b>2,86</b>
Valor mínimo	1,84	2,08	1,97	<b>2,60</b>	2,60	<b>2,24</b>
$x_m$ (média)	2,04	2,46	2,33	<b>3,03</b>	3,03	<b>2,46</b>
$S_x$ (desvio padrão)	0,18	0,33	0,29	<b>0,25</b>	0,31	<b>0,24</b>
N° de amostras	5	5	5	<b>5</b>	5	<b>5</b>
<b><i>DR<sub>mín</sub></i></b>	1,12	1,15	1,26	<b>1,71</b>	1,37	<b>0,93</b>
<b><i>DR<sub>máx</sub></i></b>	0,80	1,10	1,16	<b>0,75</b>	0,97	<b>1,67</b>
<i>DR<sub>0</sub> (tabelado)</i>	1,65	1,65	1,65	<b>1,65</b>	1,65	<b>1,65</b>
Hipótese de aceitação	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	<b>H<sub>1</sub></b>	H <sub>0</sub>	<b>H<sub>1</sub></b>

Tabela 3.1.1.C: Resultados do Critério de Chauvenet para o ensaio de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura – traço T20 e traço T50.

<b>Dados</b>	<b>T<sub>30</sub></b>	<b>T<sub>50</sub></b>
Valor máximo	3,21	2,47
Valor mínimo	3,02	2,24
$x_m$ (média)	3,13	2,36
$S_x$ (desvio padrão)	0,08	0,10
N° de amostras	4	4
<b><i>DR<sub>mín</sub></i></b>	1,40	1,24
<b><i>DR<sub>máx</sub></i></b>	0,96	1,10
<i>DR<sub>0</sub> (tabelado)</i>	1,54	1,54
Hipótese de aceitação	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>

Tabela 3.2.C: Resultados do Critério de Chauvenet para o ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura.

<b>Dados</b>	<b>Tr</b>	<b>T10</b>	<b>T20</b>	<b>T30</b>	<b>T40</b>	<b>T50</b>
Valor máximo	<b>3,25</b>	3,66	4,05	<b>5,14</b>	<b>4,74</b>	3,89
Valor mínimo	<b>2,57</b>	3,20	3,35	<b>3,50</b>	<b>3,45</b>	2,49
$x_m$ (média)	<b>3,01</b>	3,48	3,74	<b>4,52</b>	<b>3,86</b>	3,28
$S_x$ (desvio padrão)	<b>0,25</b>	0,21	0,24	<b>0,57</b>	<b>0,47</b>	0,50
N° de amostras	<b>6</b>	6	6	<b>6</b>	<b>6</b>	6
<b><i>DRmín</i></b>	<b>1,74</b>	1,30	1,60	<b>1,79</b>	<b>0,86</b>	1,57
<b><i>DRmáx</i></b>	<b>0,95</b>	0,88	1,27	<b>1,08</b>	<b>1,85</b>	1,21
<b><i>DR<sub>0</sub></i> (tabelado)</b>	<b>1,73</b>	1,73	1,73	<b>1,73</b>	<b>1,73</b>	1,73
Hipótese de aceitação	<b>H<sub>1</sub></b>	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	<b>H<sub>1</sub></b>	<b>H<sub>1</sub></b>	H <sub>0</sub>

Tabela 3.2.1.C: Resultados do Critério de Chauvenet para o ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura – traço Tr, traço T30 e traço T40.

<b>Dados</b>	<b>Tr</b>	<b>T30</b>	<b>T40</b>
Valor máximo	3,25	5,14	3,95
Valor mínimo	2,90	4,38	3,45
$x_m$ (média)	3,10	4,73	3,69
$S_x$ (desvio padrão)	0,15	0,31	0,22
N° de amostras	5	5	5
<b><i>DRmín</i></b>	1,36	1,14	1,05
<b><i>DRmáx</i></b>	1,04	1,35	1,18
<b><i>DR<sub>0</sub></i> (tabelado)</b>	1,65	1,65	1,65
Hipótese de aceitação	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>

Tabela 3.3.C: Resultados do Critério de Chauvenet para o ensaio de resistência à compressão simples aos 56 dias de cura.

<b>Dados</b>	<b>Tr</b>	<b>T10</b>	<b>T20</b>	<b>T30</b>	<b>T40</b>	<b>T50</b>
Valor máximo	<b>3,56</b>	3,79	<b>3,97</b>	5,25	4,59	<b>4,06</b>
Valor mínimo	<b>3,14</b>	2,68	<b>2,83</b>	4,30	4,05	<b>3,16</b>
$x_m$ (média)	<b>3,26</b>	3,38	<b>3,51</b>	4,80	4,35	<b>3,75</b>
$S_x$ (desvio padrão)	<b>0,16</b>	0,41	<b>0,39</b>	0,42	0,21	<b>0,34</b>
N° de amostras	<b>6</b>	6	<b>6</b>	6	6	<b>6</b>
<b><i>DRmín</i></b>	<b>0,75</b>	1,70	<b>1,77</b>	1,18	1,44	<b>1,75</b>
<b><i>DRmáx</i></b>	<b>1,88</b>	0,99	<b>1,19</b>	1,06	1,17	<b>0,93</b>
<b><i>DR<sub>0</sub></i> (tabelado)</b>	<b>1,73</b>	1,73	<b>1,73</b>	1,73	1,73	<b>1,73</b>
Hipótese de aceitação	<b>H<sub>1</sub></b>	H <sub>0</sub>	<b>H<sub>1</sub></b>	H <sub>0</sub>	H <sub>0</sub>	<b>H<sub>1</sub></b>



### Apêndice D

Os resultados obtidos pela análise da variância da regressão polinomial realizada para os diversos ensaios estão apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela 1.D: Resultados da ANOVA para o ensaio de massa específica aparente.

<b>Fonte de Variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fcal</b>	<b>SIG</b>
<b>NT</b>	5	0,0050	0,0010	6,882	0,00053
<b>Linear</b> $R^2 = 0,08$	1	0,0004	0,0004	2,904	0,10245
<b>Quadrat.</b> $R^2 = 0,86$	1	0,0039	0,0039	26,792	0,00003
<b>Cúbico</b> $R^2 = 0,95$	1	0,0004	0,0004	2,894	0,10302
<b>Quártico</b> $R^2 = 0,95$	1	0,0000	0,0000	0,018	*****
<b>Quíntico</b> $R^2 = 1,00$	1	0,0002	0,0002	1,804	0,19295
<b>Resíduo</b>	22	0,0032	0,0001		
<b>C.V.(%) = 0,71</b>					

Tabela 2.1.D: Resultados da ANOVA para o ensaio de absorção de água aos 7 dias de cura.

<b>Fonte de Variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fcal</b>	<b>SIG</b>
<b>NT</b>	5	16,544	3,308	6,201	0,00165
<b>Linear</b> $R^2 = 0,17$	1	2,884	2,884	5,404	0,03198
<b>Quadrat.</b> $R^2 = 0,77$	1	9,797	9,797	18,361	0,00045
<b>Cúbico</b> $R^2 = 0,99$	1	3,632	3,632	6,808	0,01775
<b>Quártico</b> $R^2 = 0,99$	1	0,004	0,004	0,007	*****
<b>Quíntico</b> $R^2 = 1,00$	1	0,226	0,226	0,424	*****
<b>Resíduo</b>	18	9,604	0,534		
<b>C.V.(%) = 4,41</b>					

Tabela 2.2.D: Resultados da ANOVA para o ensaio de absorção de água aos 28 dias de cura.

<b>Fonte de Variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fcal</b>	<b>SIG</b>
<b>NT</b>	5	66,558	13,312	15,319	0,00000
<b>Linear</b> $R^2 = 0,09$	1	6,157	6,157	7,085	0,01393
<b>Quadrat.</b> $R^2 = 0,86$	1	51,239	51,239	58,967	0,00000
<b>Cúbico</b> $R^2 = 0,97$	1	7,179	7,179	8,262	0,00867
<b>Quártico</b> $R^2 = 0,98$	1	0,932	0,932	1,073	0,31109
<b>Quíntico</b> $R^2 = 1,00$	1	1,051	1,051	1,210	0,28273
<b>Resíduo</b>	23	19,985	0,869		
<b>C.V.(%) = 6,47</b>					

Tabela 2.3.D: Resultados da ANOVA para o ensaio de absorção de água aos 56 dias de cura.

<b>Fonte de Variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fcal</b>	<b>SIG</b>
<b>NT</b>	5	51,271	10,254	20,908	0,00000
<b>Linear</b> $R^2 = 0,25$	1	12,589	12,589	25,670	0,00004
<b>Quadrat.</b> $R^2 = 0,93$	1	35,230	35,230	71,838	0,00000
<b>Cúbico</b> $R^2 = 0,98$	1	2,564	2,564	5,229	0,03174
<b>Quártico</b> $R^2 = 0,99$	1	0,215	0,215	0,439	*****
<b>Quíntico</b> $R^2 = 1,00$	1	0,668	0,668	1,363	0,25495
<b>Resíduo</b>	23	11,280	0,490		
<b>C.V.(%) = 4,90</b>					

Tabela 3.1.D: Resultados da ANOVA para o ensaio de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura.

<b>Fonte de Variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fcal</b>	<b>SIG</b>
<b>NT</b>	5	4,239	0,848	14,018	0,00000
<b>Linear</b> $R^2 = 0,32$	1	1,300	1,300	21,501	0,00013
<b>Quadrat.</b> $R^2 = 0,63$	1	1,300	1,300	21,501	0,00013
<b>Cúbico</b> $R^2 = 0,81$	1	0,780	0,780	12,898	0,00162
<b>Quártico</b> $R^2 = 0,87$	1	0,263	0,263	4,343	0,04900
<b>Quíntico</b> $R^2 = 1,00$	1	0,535	0,535	8,850	0,00699
<b>Resíduo</b>	22	1,330	0,061		
<b>C.V.(%) = 9,66</b>					



Tabela 3.2.D: Resultados da ANOVA para o ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcal	SIG
NT	5	8,386	1,677	18,520	0,00000
Linear $R^2 = 0,04$	1	0,323	0,323	3,570	0,06960
Quadrat. $R^2 = 0,76$	1	5,180	5,180	57,202	0,00000
Cúbico $R^2 = 0,81$	1	0,640	0,640	7,069	0,01302
Quártico $R^2 = 0,86$	1	0,500	0,500	5,525	0,02630
Quíntico $R^2 = 1,00$	1	1,742	1,742	19,235	0,00016
Resíduo	27	2,445	0,091		
C.V.(%) = 8,24					

Tabela 3.3.D: Resultados da ANOVA para o ensaio de resistência à compressão simples aos 56 dias de cura.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcal	SIG
NT	5	10,469	2,094	24,470	0,00000
Linear $R^2 = 0,43$	1	4,521	4,521	52,839	0,00000
Quadrat. $R^2 = 0,72$	1	2,640	2,640	30,859	0,00000
Cúbico $R^2 = 0,87$	1	1,957	1,957	22,874	0,00005
Quártico $R^2 = 0,89$	1	0,157	0,157	1,845	0,18557
Quíntico $R^2 = 1,00$	1	1,192	1,192	13,935	0,00089
Resíduo	27	2,310	0,086		
C.V.(%) = 7,50					

Tabela 4.D: Resultados da ANOVA para o ensaio de durabilidade aos 7 dias de cura.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Fcal	SIG
NT	5	18,306	3,661	15,066	0,00000
Linear $R^2 = 0,59$	1	10,760	10,760	44,280	0,00000
Quadrat. $R^2 = 0,98$	1	7,155	7,155	29,444	0,00002
Cúbico $R^2 = 0,98$	1	0,054	0,054	0,224	*****
Quártico $R^2 = 0,98$	1	0,000	0,000	0,000	*****
Quíntico $R^2 = 1,00$	1	0,336	0,336	1,382	0,25229
Resíduo	22	5,346	0,243		
C.V.(%) = 8,60					

Tabela 5.D: Resultados da ANOVA para o ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova ensaiados a durabilidade aos 28 dias de cura.

<b>Fonte de Variação</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fcal</b>	<b>SIG</b>
<b>NT</b>	5	18,306	3,661	15,066	0,00000
<b>Linear</b> $R^2 = 0,59$	1	10,760	10,760	44,280	0,00000
<b>Quadrat.</b> $R^2 = 0,98$	1	7,155	7,155	29,444	0,00002
<b>Cúbico</b> $R^2 = 0,98$	1	0,054	0,054	0,224	*****
<b>Quártico</b> $R^2 = 0,98$	1	0,000	0,000	0,000	*****
<b>Quíntico</b> $R^2 = 1,00$	1	0,336	0,336	1,382	0,25229
<b>Resíduo</b>	22	5,346	0,243		
<b>C.V.(%) = 8,60</b>					